



TITLE:

森林土壌の諸性質及び植生に及ぼす微地形の役割に関する方法論的研究(Dissertation_全文)

AUTHOR(S):

小林, 繁男

CITATION:

小林, 繁男. 森林土壌の諸性質及び植生に及ぼす微地形の役割に関する方法論的研究. 京都大学, 1989, 農学博士

ISSUE DATE:

1989-03-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.r6861>

RIGHT:

森林土壌の諸性質及び植生に及ぼす
微地形の役割に関する方法論的研究

小林 繁男

1989年

森林土壌の諸性質及び植生に及ぼす
微地形の役割に関する方法論的研究

小林 繁男

1989年

目 次

第1章 序 論	1
第1節 緒 言	1
第2節 研究目的	4
第2章 研究方法と調査地の概要	6
第1節 地形の測定方法	6
第1項 「地形カテナ」から導かれる微地形特性値	7
第2項 「単位区」から導かれる微地形特性値	8
第3項 微地形の数値分類法	10
第2節 土壌・植生の調査法と分析法	10
第1項 土壌の調査法と分析法	10
第2項 植生の調査法と解析法	11
第3節 調査地の概要と各調査地での研究目的	12
第4節 要 約	18
第3章 微地形の数値分類と微地形特性値の特徴	19
第1節 微地形の数値分類	19
第1項 1地形カテナ	20
第2項 同一尾根の4地形カテナ	24
第3項 尾根の相違した複数の地形カテナ	26
第2節 単位区の大きさとそれから導かれた微地形特性値の特徴	31
第3節 微地形の数値分類の意義	34
第1項 数値的に明らかにした微地形の形態についての考察	34
第2項 微地形分類の定義についての考察	35
第4節 要 約	37
第4章 微地形と土壌、植生並びに伐採による土壌の変化との関係	38
第1節 微地形に関連した土壌の諸性質並びに土壌型の分布	38
第1項 褐色森林土	38
第2項 乾性ポドゾル	41
第3項 湿性ポドゾル	45
第4項 未熟土壌	48
第2節 森林植生、天然更新状態、造林木の成長と微地形との関係	52
第1項 亜高山針葉樹林・スギ天然林の森林構造、林床植生と天然更新	52
第2項 ヒノキ造林木の成長	55
第3節 森林伐採に伴う土壌の変化	56
第1項 ヒノキ・スギ人工林での伐採	56
第2項 ダグラスファー天然林での伐採	61

第4節 土壤特性方程式—地形関数の解析	66
第5節 数値分類された微地形の有効性	70
第1項 土壤・植生と微地形の対応関係についての考察	70
第2項 微地形による未熟土の分類についての考察	71
第3項 微地形単位による土壤型の細分についての考察	72
第4項 伐採に伴う土壤の変化についての考察	73
第6節 要 約	74
結 言	77
摘 要	78
謝 辞	82
参考文献	83

第1章 序 論

第1節 緒 言

近年、人間の生活環境と森林との結びつきはますます強くなり、レクリエーションの場や、山地下流域への水供給、大気や水質の浄化など森林の持つ公益的機能に対する社会的ニーズは非常に高まっている。一方長い林業の歴史を背景に累積的な施業のインパクト、大気汚染などによる外部インパクト、道路開設などによる攪乱的なインパクトなど人為インパクトは森林生態系を変化させ、自然災害の頻発、水資源の枯渇などに顕在化しつつある。このため、環境保全機能の解明は森林生態系の研究で重要な課題となって来ている。

この森林生態系の中で森林土壌は母材に気候因子、生物因子や地形因子などが長期間作用して生成される。そのため土壌生態系は森林生態系の基本的な構成要素と考えられ、土壌生態系の成立過程を明らかにすることは外部インパクトによる森林生態系の変動を解明する上で基礎的な情報を提供すると考えられる。

我国の森林土壌は山地斜面に広く分布する。しかし、土壌学では Dokuchaev 以来、安定的に存在する残積土壌にもつばらの焦点があてられ、山地斜面上の運積土壌や沖積土壌などは取り残され、非正常土壌、非成帯土壌の中に含まれ、未熟な土壌として取り扱われてきた(加藤、1979)。この運積土壌・沖積土壌が未熟な土壌としての認識で片付けられている場合、人為的なインパクトや長期間の累積的なインパクトによる土壌生態系の変化を明らかにすることが難しいと考えられる。

運積土壌の研究では、Butler(1982)の K-cycle、Marron (1982)の Colluvium の生成、古川(1976)の土層累重則、Matsui(1967)の土壌層位学、田村(1971)の火山灰層位からの地形形成環境の解明など重要な方向があり、山地地形が最も主要な関係を持っていることは明瞭である。山地地形-運積土壌の関係を明らかにすることは、運積土壌の体系化に重要な礎石となるばかりか、外部インパクトに伴う森林土壌の変化を解明する上でも重要である。そのため山地地形を解析し、土壌の諸性質や植生と地形との関係を解明する必要がある。

これまでの山地地形の形態記載・分類の研究は(1)縦断形についての記載が行われ、凸型上昇斜面、凹型下降斜面と平衡斜面に斜面が分類された(Penck 1924, Aandel 1948, Young 1963, Curtis et al. 1965)。(2)縦断形にコンターの断面を複合した記載が行なわれ、凹凸を組合せて4型が区分された(Strahler 1956, Troeh 1965, Ruhe & Walker 1968, Ahnert 1970)。数値的な記載を取り入れたものとして(3)斜面の傾斜角とコンターの形状について国土地理院(1982)は、尾根型緩斜面や谷型緩斜面と急斜面に区分した。(4)さらに標高、方位、傾斜、縦断形、コンターを考慮して区分が行なわれた(Lanyon & Holl 1983)。(5)多数の詳細な特性値を用いて地形の記載が行なわれてきた(Speight 1968, 1976, 1984)。一方(6)幾つかの方程式にもとづく斜面の記載が発達し(Troeh 1968, Armstrong 1976, Kirkby 1976)、(7)さらに斜面モデルも提起されている(Scheidegger 1961, Ahnert 1976, Gossman 1976, Hirano 1976, Trofinov et al. 1984)、(8)また標高マトリックスを用いた地形数値解析によるシュミレーションも発達してき

た(Evans 1972, Hirano et al. 1970, Yamamoto 1980)。垂直方向では起伏、水平方向には傾斜、方位、地域凹凸など、多くの地形特性値が標高マトリックスから導き出される。この方法は地形の形態を数値記載するには極めて有効な方法であるが、一般に標高マトリックスをコンピューターに入力する時、地形図をもとにするため、用いた地形図の縮尺で土壌との関係や、微地形が評価されなくなるおそれがあり、地形を解析する目的を明瞭にしておく必要がある。また以上からも明らかなように、微地形を数値記載し、それらの特性値を用いて分類した例はない。本研究の主要な目的の一つは微地形を数値分類する方法について検討することである。

地形研究の発展段階として、第1段階は斜面の形態の記載・分類、第2段階は斜面の変化過程と形態の成因の解明、第3段階は地形発達史となり、第3段階が今日的に最も重要であると、小泉(1977)は述べている。本研究では山地斜面の土壌と微地形との関係を明らかにするという目的に沿えば第1～第3段階まですべて重要であり、山地斜面の詳細で数値的な記載がなされれば、それをもとに斜面の変化の過程と形態の成因がより明らかにされ、微地形と土壌の関係も明確になると考える。

地形分類の体系だった研究では Dalrymple ら(1968)がより詳細に微地形を区分し、地形形成作用、表層物質の移動について検討している。それによると微地形を9つの単位に区分し、それらは(1)interfluvium: 分水嶺となっており、初期土壌生成がおこなわれ、中間水は上下に移動する。(2)seepage slope: 表層の沈降、雨水の浸潤と溶脱、中間流の側方移動と側方洗脱、側方あるいは垂直方向へ土壌が移動する。(3)convex creepslope: 重力により表層物質が匍行する。(4)fall face: 母材が露出し物理化学的風化、物質の落下、地滑りがある。(5)transportational midslope: 地表流、中間流があり、活発な侵食、マスマーブメントによる物質の下方斜面への運搬、移動があり物理化学的洗脱をうける。(6)colluvial footslope: ほ行と側方洗脱があり崩積物の再堆積が行われる。表面洗脱、中間流もおこる。(7)alluvial toeslope: 中間流があり、上部斜面からでなく上部谷からの河川による沖積物の再堆積がおこる。(8)channel wall: 溶食、落下、遷急線により(7)と区分される。(9)channel bed: 流水による下方行への物質の移動が行われる。また定期的な増勾作用と溶食がおこっているとした。この Dalrymple らの微地形の分類は詳細で体系的であり、地形形成作用も考慮してあるため土壌と微地形の関係を検討する時に非常に有効である。しかし、この分類は地形の形態の記載が定性的であるため、特性値を用いた数値分類により上記の微地形の区分が可能か検討する必要がある。

山地地形と土壌との関係は従来から研究がなされている。日本では山田(1955)が、地形と地質、土壌、気候、人工林の成育状態、天然林の分布との関係を研究している。それによると地形を凸型平坦地-山稜、凸型傾斜地-凹型傾斜地-凹型平坦地の4種を区分し、これらと残積土と運積土との関係をまとめている。

その後、式(1960)は斜面を凹凸と傾斜、谷密度、起伏から区分した。凸斜面の多くは緩線部の小起伏地形面から傾斜度を増して連続的に移化する。凹斜面は凸斜面をしだいに蚕食して面積を拡大しようと作用し、凸斜面はこの侵食に対して、抵抗的に作用し、ある場所では不連続に分断された形をとる。植被がある場合は表層物質の流亡はほとんど考えられないと述べている。

また地形分類の応用について、久保(1961)は微地形分類が土壌調査に有効であるが、しかし湿地、岩石地など内部的に相違するものが併列してあり、必ずしも地形生成論的に系統だった分類

とはいいい難いとしている。

さらに斜面を詳細に検討した竹下・中島(1960, 1961)は凹形要素の多い斜面を塊状侵食の形態の谷開析として谷型斜面、凸形要素の多い斜面を尾根型斜面とし、直線的要素を強く持つ斜面を中間型斜面として区分している。この上にある土壌について、残積土、匍行土、崩積土は、単独であられるのではなく、現実の斜面の推積はこれらの層的複合によって構成される。崩積性土の概念が適用できるのは傾斜角 10° 以上であるとして、そこでの土壌の移動と推積によって、微地形が3型の中でも区分され得ること述べている。

この様な、土壌と地形との関係についての研究が行なわれてきたが、その後はあまり体系だった研究が無い。しかも微地形の分類が不十分であったり、定性的であるため重要な微地形単位が欠落したりしている。このため微地形を系統的に分類し、土壌-微地形関係を整理する必要がある。また褐色森林土だけでなく、違った土壌群についても微地形との関係を検討する必要がある。

どの研究でも指摘されている点は、地形と土壌の関係では地形の形成作用、あるいは表層物質の移動様式と土壌の諸性質との結びつきが強いということである。土壌の諸性質と微地形との関係に地形形成作用が介在しており、この点に関して、田村(1974)は地形と土壌との関係は一方向的ではなく、外作用をうけながら互いに影響しあって形成され、地表の起伏がそれ自体は変化しなくても水や可溶性物質の移動を規定し、地形が変化する過程で土壌母材が移動・推積する。降水が微地形に応じ、中間流-飽和流-地表流-水みち流となり、それに導かれて土壌匍行-側方洗脱-地表侵食-水みち侵食・山くずれが、特有の微地形で発生していると述べ、地形形成作用を水と土壌の動態から説明している。

植生と微地形との関係については、むしろ植生と土壌の関係が多く研究されてきた。土壌は地形と関係を示すため、植生-土壌-地形との関係となり、中でも前田ら(1970)の林床型区分は土壌型や微地形によく対応関係を示していた。しかし、森林型や後継樹更新状態、植物群落の構造と微地形との関係を研究した例は少ない。

この様に山地斜面における土壌の動態的な諸性質が明らかになれば土壌の攪乱による変化もそれらを基礎に解明し得るであろう。森林土壌への強い攪乱の一つは伐採・搬出によるものと思われる。伐採による土壌の変化についての報告は多数ある(Binkley 1984, Dargin 1980, Dyrness 1965, 1967, Froelich et al. 1983, 1985, Gent et al. 1983, 1984, Snider 1985, Wert and Thomas 1981, Snyder et al. 1984, 1985, 柴田ら1951、塩崎1980、山谷1965, 1966, 有光1980)。しかし伐採に伴う土壌の変化は山地斜面に一樣に生じない。それを微地形の問題として捉えた研究例は少なく(堤 1964, 上田ら 1965)、まだ十分とは言えず、これらに関しても微地形との関係で検討する必要がある。

カテナ上あるいは地形上において土壌の諸特性が変化するという観点から、土壌-地形関係を数式化するための曲線へのあてはめや回帰分析について、検討した報告が多数なされている(Walker 1966, Walker & Ruhe 1968, Ruhe & Walker 1968, Walker 1968, Kleiss 1970, Furley 1968, Vreeken 1973, Ahnert 1970)。これらは多項式、あるいは単回帰、重回帰の関係について述べられているが、特定の土壌特性と特定の地形特性との回帰であり、一般的な妥当性に乏しい。このことは、第1に地形を扱った説明変数が限られたもの例えば傾斜、尾根からの距

離などが主体であり、山地地形がある 1 側面しか表されていない点からくるものと考えられる。第 2 に斜面を凸型部、凹型部、あるいは斜面上部、斜面下部などに区分した上で回帰をさせ、山地地形－カタナからの特性値が単一に説明変数とならない場合があることを示唆している。第 3 に標本数が少ないことからくるものと考えられる。本研究では土壌特性と微地形特性値との関数関係を示す土壌特性方程式とする。そしてこの土壌特性方程式における地形変数の一般的な妥当性をもった解析を検討する必要がある。

以上、従来からの研究を検討してみると次の様な問題点が要約できる。

1. 微地形の記載が定性的あるいは少数の地形特性値に依っている。
2. 山地斜面における微地形の系統だった分類が少なく、ほとんどが定性的あるいは少数の特性値しか用いていない。
3. 区分されるべき微地形単位を欠いているため微地形－土壌の関係の検討が不十分となっている。褐色森林土以外の土壌群と微地形との関係の検討がされていない。
4. 植生と地形との関係は林床型や林木の生長などを除いて検討が不十分である。
5. 森林伐採に伴う土壌の変化について、微地形との関係で明らかにした例がほとんど無い。
6. 土壌と微地形の関係は数式化されている。しかし、地形を扱った説明変数が限られていたり、標本数が少ない。

第 2 節 研究の目的

本研究の目的は、森林土壌の諸性質と植生に及ぼす微地形の役割について方法論的に解明することである。まず山地斜面における微地形の形態的特性を数値記載することによって微地形を分類する。微地形と土壌・植生との対応関係を明確にする。この関係を微地形の変数で数式化する。さらに森林伐採による土壌の変化を微地形別に解明する。

従来の微地形の記載と分類で体系だったものに Dalrymple ら(1968)の 9 つの微地形分類がある。しかし形態の区分が傾斜を除いて定性的であるため、本研究では微地形の形態を詳細に記載し、これをもとに微地形の数値分類を行なう。その際に Dalrymple らの 9 つの微地形単位を基礎に、田村(1974)の水の動態、侵食作用と地形変化の説を取り入れて微地形単位を定義する。微地形の分類は尾根から谷にかけて単一の斜面系列における分類と複数の斜面系列における分類を行い、結果について数値分類の妥当性を検討する。

褐色森林土、乾性ポドゾル、湿性鉄型ポドゾル、未熟土を対象として、土壌と微地形の対応関係を明らかにする。褐色森林土は断面形態、土壌の乾湿、構造などから土壌型が分類されているため、地形カタナにおける水分環境との関係は強いものと推測される。褐色森林土の土壌型と数値分類した微地形との検討により、この関係を明らかにする。乾性ポドゾルについてはその分布パターンやポドゾル化作用と微地形との関係を検討する。湿性鉄型ポドゾルは表層還元作用を受けた土壌で(松井 1980)、透水性などの物理性が不良で可給態養分に乏しく造林木の更新を困難にしている。表層還元作用は斜面における水の動態と密接な関係があり、湿性鉄型ポドゾルと微地形との関係を検討する必要がある。未熟土は母材の侵食、移動、堆積などの在り方に依り性質が相違する。この点は未だ明らかでなく、分類も確立していない。未熟土の分布と微地形の関係を考察し、分類についても検討する。

森林群落と微地形との関係は未だ十分明らかにされていない。特に後継稚樹の更新状態や林床植生の多様性と微地形の関係はほとんど報告がない。林床型と土壌との対応関係は明らかにされているものの、微地形との関係は十分ではない。これらのため森林群落の特性、林床型、天然更新、造林木の成長と微地形との関係を明らかにする。

森林伐採などのインパクトによる土壌の変化については多くの報告がなされてきた。土壌の変化は森林を構成する樹種と大きさ、伐採時期、伐採搬出方法、気候、土壌特性、造林方法と地形に依存する。しかしこの土壌の変化は尾根から谷にかけて一様に生ずるのではない。微地形に応じた土壌の変化については未だに十分明らかでなく、微地形との関係を検討する必要がある。

土壌と微地形との関係は土壌特性方程式で数式化されている。しかし地形を扱った説明変数が限られていたり、斜面を上下に区分したり、標本数が少ないなど問題点がある。また我が国においてはその報告はきわめて少ない。そこで数値的な記載をもとにした微地形と土壌の関係のより総合的な土壌特性方程式の解を求める。

本論文の内容は：

1. 微地形の形態の新たな記載方法と分類方法を提示する。(第2章)
2. 微地形をより詳細に記載し、主成分分析により数値分類を行う。(第3章第1節)
3. 微地形特性値について検討を行う。(第3章第2節)
4. 数値分類された微地形の意義を考察する。(第3章第3節)
5. 微地形単位と褐色森林土、ポドゾル、未熟土との関係を明らかにする。(第4章第1節)
6. 微地形単位と林床型、森林構造、造林木の成長との関係を明らかにする。(第4章第2節)
7. 伐採による土壌の変化を微地形との関連で明らかにする。(第4章第4節)
8. 土壌特性方程式の地形関数の総合的な解を求める。(第4章第4節)
9. 森林土壌や植生に関係する微地形のはたす役割について考察する。(第4章第5節)

第2章 研究方法と調査地の概要

第1節 微地形の測定方法

山地斜面は非常に複雑で変化に富んでいる。この複雑な山地斜面の微地形を理解するには多くの微地形特性値が必要となる(Speight 1980)。また多変量特性値を扱う場合は区分に数値分類の手法が適している。

対象とする地形は斜面とし、尾根から谷にかけた斜面系列でのカタナとした(toposequence : 地形カタナ、地学辞典 1981)。この地形カタナ上での微地形をコンパス測量により実測し、記載した。この際に実測した単位面積を本研究では「単位区」と呼ぶ。この単位区の面積は田村(1980)が提案した微地形の最小単位にほぼ相当する。田村は微地形を面積で $10^{-2} - 10^{-5} \text{Km}^2$ 、大部分は最近 10^3 年以降に形成され、多くは現在発達中とみなせせるが一部には 10^4 オーダーの年代をもつ化石地形が含まれているとしている。

地形カタナ(地形図を用いて)と単位区(一定面積をコンパス測量を用いて)の2つから導かれる微地形特性値により微地形の形態を記載した。本研究では22の微地形特性値をあげた(表

表2-1-1 地形カタナ(地形図)と
単位区から導かれる微地形特性値

略名	地形特性値	式番号	単位
(A) 地形図から導かれた特性値			
	地形カタナ (Toposequence)		
ALT	標高 (Altitude)	(1)	m
MCH	集水高 (Catchment height)	(2)	m
MDH	排水高 (Dispersal height)	(3)	m
MRH	相対高 (Relative height)	(4)	%
MCL	集水長 (Catchment length)	(5)	m
MDL	排水長 (Dispersal length)	(6)	m
MRL	相対長 (Relative length)	(7)	%
MCS	集水傾斜角 (Catchment slope)	(8)	°
MDS	排水傾斜角 (Dispersal slope)	(9)	°
MRRL	相対縦断線型性 (Relative radius linearity)	(10)	
(B) 単位区から導かれる特性値			
AZI	方位 (Azimuth)	(11)	°
USU	上方傾斜角 (Slope to upper)	(12)	°
USL	下方傾斜角 (Slope to lower)	(13)	°
USLE	左方傾斜角 (Slope to left)	(14)	°
USR	右方傾斜角 (Slope to right)	(15)	°
URS	相対傾斜角 (Relative slope)	(16)	°
URI	起伏指数 (Relief index)	(17)	
USC	表面曲率 (Surface curvature)	(18)	%
URL	縦断線型性 (Radius linearity)	(19)	
UCL	コンター線型性 (Contour linearity)	(20)	
UCA	集水面積 (Catchment area)	(21)	m^2
UDA	排水面積 (Dispersal area)	(22)	m^2

2-1-1)。この中で地形カタナからの集水面積、排水面積、また単位区からの曲率量は方法的

に測定することが難しく除いた。この単位区は不規則な形態的变化が少ない大ききで、研究の目的により適当な面積が選ばれる。単位区を25、000分の1や50、000分の1の地形図に適用し、地形図から(B)の微地形特性値を導くと、しばしば単位区の面積が大きくなり、微地形の特性が損なわれ、微地形の情報を欠くことになる。そのため単位区は野外で実測することになる。

第1項 「地形カタナ」から導かれる微地形特性値

山地斜面での地形カタナ上と単位区との関係は図2-1-1となり単位区の実測を調査全域に広げると地形図も描くことが出来る。地形カタナから導かれる微地形特性値は下記のように計算する。

地形図上で南北方向をX軸、東西方向をY軸とし、標高をZ軸と設定する。調査地点は (X_n, Y_n, Z_n) と規定する。また調査地点のある地形カタナの尾根を (X_r, Y_r, Z_r) 、谷を (X_s, Y_s, Z_s) と定める。但しX値、Y値は実スケールで計算した値を示す。全ての地形カタナから導かれる微地形特性値はこの3次元の値から計算することができる。

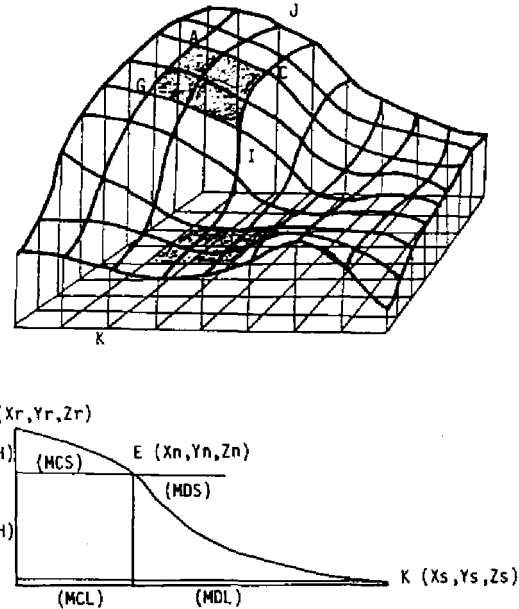


図2-1-1 地形カタナにおける各微地形特性値の関係 (J-K:地形カタナ、A-C-I:単位区)

標高 (ALT) は:

$$ALT = Z_n \quad \text{----(1)}$$

集水高 (MCH) は:

$$MCH = Z_r - Z_n \quad \text{----(2)}$$

排水高 (MDH) は:

$$MDH = Z_n - Z_s \quad \text{----(3)}$$

相対高 (MRH) は:

$$MRH = Z_n / (Z_r - Z_s) \quad \text{----(4)}$$

集水長 (MCL) は:

$$MCL = \{(X_r - X_n)^2 + (Y_r - Y_n)^2\}^{1/2} \quad \text{----(5)}$$

排水長 (MDL) は:

$$MDL = \{(X_n - X_s)^2 + (Y_n - Y_s)^2\}^{1/2} \quad \text{----(6)}$$

相対長 (MRL) は:

$$MRL = (MCL) / \{(MCL) + (MDL)\} \quad \text{----(7)}$$

集水傾斜 (MCS) は:

$$\tan (MCS) = (Z_r - Z_n) / (MCL) \quad \text{----(8)}$$

排水傾斜 (MDS) は:

$$\tan (MDS) = (Z_s - Z_n) / (MDL) \quad \text{----(9)}$$

相対縦断線型性 (MRRL) は：

$$MRRL = (MCS) + (MDS) \quad \text{----- (10)}$$

但し、 $(MRRL) > 0$ のときは凹型、 $(MRRL) = 0$ で直線、 $(MRRL) < 0$ のときは凸型を示す。

第2項 単位区から導かれる微地形特性値

単位区はE点を原点とするX-Y平面、 $10\text{m} \times 10\text{m}$ として各調査地で実測した(図2-1-2)。単位区の大きさは微地形単位の最小の大きさ(田村 1980)であり、林床型の分布の広がり(前田、宮川 1970)と、土壤個体の大きさ(Buol et al, 1973)から 100m^2 を考えた。調査地の中心を通った垂直方向をZ軸とするとこの単位区は3次元空間となる。コンパスを用いたレベル測量を中心点Eから方形区 $10\text{m} \times 10\text{m}$ を形成する8交点(A~I)について行った。B交点の方向を最大傾斜方向とし、縦断線をY軸、水平軸をX軸とすると8交点は $(x_{a-i}, y_{a-i}, z_{a-i})$ となる。ここで中心E点は $(0, 0, 0)$ で、

$|x| = |y| = s/2$ となり、 s は単位区の一辺で $s/2 = 5\text{m}$ となる。単位区は微地形の微分として扱い中心E点からの各交点A~Iの線は直線と考える。また目的に合ったスケールの地形図の場合はコンパス測量は必要ではなく、 $x_n = X_n$, $y_n = Y_n$, $z_n = Z_n$ として、単位区からの微地形特性値も計算できる。

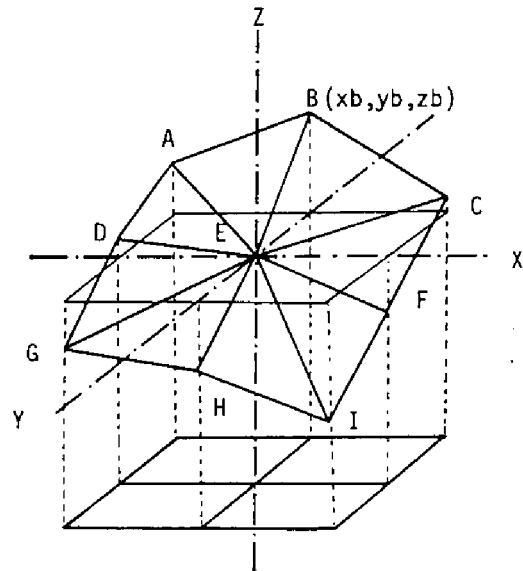


図2-1-2 単位区概念図。単位区は水平面積が $10\text{m} \times 10\text{m}$ となるように中心E点からコンパス測量を行い、8交点A-Iの標高差、傾斜角を実測する。

単位区方位 (AZI) は：

$$AZI = (z_{a-i}) \text{ の最大値の方位} \quad \text{----- (11)}$$

但し、通常はB交点方向にあたる。

上方傾斜 (USU) は：

$$\tan (USU) = z_b / y_b = z_b / 5 \quad \text{----- (12)}$$

但し、 $|y_b|$ は単位区の一辺の長さの $1/2$ である。

下方傾斜 (USL) は：

$$\tan (USL) = z_h / y_h = z_h / 5 \quad \text{----- (13)}$$

左方傾斜 (USLE) は：

$$\tan (USLE) = z_d / x_d = z_d / 5 \quad \text{----- (14)}$$

右方傾斜 (USR) は：

$$\tan (USR) = z_f / x_f = z_f / 5 \quad \text{----- (15)}$$

単位区相対傾斜 (URS) は：

$$\tan (URS) = \{ |(USU)| + |(USL)| \} / 2 \quad \text{-- (16)}$$

起伏指数 (URI) は：

$$URI = \sum z_n \quad \text{----(17)}$$

但し、 n は $a \sim i$ 。起伏指数は $A-E-I$ 、 $B-E-H$ 、 $C-E-G$ 、 $F-E-D$ 、の各線型性の合計である。 $(URI) > 0$ の時は凹型面を表わし、 $(URI) = 0$ で平坦面を表し、 $(URI) < 0$ の場合は凸型面をあらわす。8つの交点の内、1点だけが高いかあるいは低い時、中心E点からその交点に向かった傾斜角は $(URI) = \pm 1.00$ のとき $\pm 11.3^\circ$ となり、 $(URI) = \pm 2.00$ で $\pm 21.8^\circ$ となり、 $(URI) = \pm 3.00$ でその傾斜角は $\pm 31.0^\circ$ となる。実際には8交点の高低差の積算のため傾斜角はもっと小さい。それ故に $|(URI)| > 2$ となつてはじめて凹凸型面が顕著になると推定される。起伏指数を用いて単位区の平面 (facet)、曲面 (segment) を推定するため、 $|(URI)| > 2.00$ は一つの基準と考えられる。

表面曲率 (USC) は：

$$USC = (\sum S_n) / S^2 \quad \text{----(18)}$$

但し S^2 は単位区の面積 (100m^2)、 S_n は $a \sim i$ までの8つの三角形の面積を示す。 $E-A$ 、 $E-B$ 、 $A-B$ を直線と仮定すると三角形 ABE の面積 (S_a) はヘロンの公式により、 $S_a = (s - ea)(s - eb)(s - ab) / s$ 、 $s = (ea + eb + ab) / 3$

ここで ea 、 eb 、 ab は $E-A$ 、 $E-B$ 、 $A-B$ の直線の長さであり、それらは

$$ea = (S / 2 + z_a)^{1/2}$$

$$eb = (S / 2 + z_b)^{1/2}$$

$$ab = \{S / 4 + (z_a - z_b)\}^{1/2}$$

となる。

縦断線型性 (URL) は：

$$URL = (USU) + (USL) \quad \text{----(19)}$$

コンター線型性 (UCL) は：

$$UCL = (USLE) + (USR) \quad \text{----(20)}$$

従来、縦断線型性やコンター線型性は縦断曲率 (radius curvature) とコンター曲率 (contour curvature) として検討されてきた。本研究では直線あるいは折れ線と考える。そこで $(URL) > 0$ 、 $(UCL) > 0$ の場合、線型性は凹型折れ線を表し、 $(URL) = 0$ 、 $(UCL) = 0$ の時は直線を示し、 $(URL) < 0$ 、 $(UCL) < 0$ の時は凸型折れ線を表す。

地形カテナ上での集水、排水の境界は不明瞭でそれを決定することは非常に難しい。しかし単位区の場合、便宜的にこれらの面積を計算できる。すなわち $z_a > 0$ かつ $z_b > 0$ の時、三角形 ABE は集水面とし、 $z_a < 0$ かつ $z_b < 0$ の時、三角形 ABE は排水面となり、 $z_a > 0$ かつ $z_b < 0$ あるいは $z_a < 0$ かつ $z_b > 0$ の時はこの三角形 ABE は集水面、排水面どちらにも定義されない。

そこで単位区の集水面積 (UCA) と排水面積 (UDA) は：

$$UCA = \sum (\text{集水面として定義された三角形の面積}) \quad \text{----(21)}$$

$$UDA = \sum (\text{排水面として定義された三角形の面積}) \quad \text{----(22)}$$

実際の集水面積、排水面積はより広いと考えられる。しかし、ここで定義された集水面積、排水面積は限定的であるが理解し得るものである。

以上の微地形特性値は全て3次元の (X_n, Y_n, Z_n) または (x_n, y_n, z_n) から計算で

きる。

第3項 微地形の数値分類法

分類はその分類された単位が均一性を持ち、単位間に特性（特徴）が定義づけられることが重要である。また分類された単位は分類を行う目的にも合致していなければならない。従来の山地斜面の分類については（1）斜面の形態的類型区分、（2）斜面の成因的分類—構成物質、形成営力、形成時期、（3）水系、分水界による斜面の区分とに羽田野(1971)がまとめている。斜面の構成物質は植生、堆積有機物、土壌、風化岩礫などが考えられる。

本研究では水系流域の要素として地形カテナー尾根から山麓部までの系列(Young 1972)—に限定し、このスケールは田村(1980)が提案した微地形を最小単位とする。最小単位とした微地形の形態を数値的に記載し区分する(Speight 1976)。区分された微地形単位を成因を考慮して構成物質で意義付ける。

まず第1項、第2項で定義した微地形特性値を用いて微地形の数値分類を行なう。通常約20の多変量としての微地形特性値を扱うため、数値分類解析法のひとつ主成分分析(Principal Component Analysis, 奥野ら 1978)を用いた。

諸特性はcm, g, %など測定単位が相違するため相関行列から計算を行う。その結果、主成分の固有値、寄与率そして主成分毎の固有ベクトル、因子負荷量が得られる。固有値が1以上ならばその主成分は総合特性値と考えられ、1未満であるならば総合特性値を抽出した残滓と考えられる。寄与率からその主成分にどれ程の変数の情報を表しているかを判断できる。また主成分に対する変数の相関は因子負荷量で表され、その係数は固有ベクトルで表されるため各主成分がどの変数を総合化しているかを判断することができる。この固有ベクトルを用いて重み付けをし標本の主成分の値（スコア）を計算することができ、スコアの散布図から集団の異質性や区分に利用できる。

第2節 土壌と植生の調査分析法

第1項 森林土壌の調査分析法

本研究でもちいた土壌の調査分析法は以下に従った。

土壌断面記載は「国有林野土壌調査方法書」(1955)により行い、土壌の分類は「林野土壌の分類(1975)」に従った。

主に表層土壌—A層において土壌試料を採取し、物理化学性を分析した。化学性の分析に用いた方法は以下の通りである。

pH：風乾細土に1：2.5の割合で水を加え、ガラス電極法を用いて測定した。

置換酸度(Y1)：常法により1N塩化カリウム溶液を用いて抽出し、水酸化ナトリウムで中和滴定して測定した。

全炭素、全窒素：CNコーダー（柳本 MT-500型）により燃焼法を用いて測定した。

塩基置換容量(C.E.C.)：Peech法に準拠して測定した(土壌養分分析法 1975)。

置換性塩基類：塩基置換容量を分析する際、1N酢酸アンモニウム浸出液中のカルシウム(ex. Ca)、マグネシウム(ex. Mg)、カリウム(ex. K)を原子吸光分光分析により定量した(土壌養分分析法1975)。

それぞれの土壌群の特徴を把握するために以下の化学分析を行った。

褐色森林土については無機態窒素(アンモニア態窒素と硝酸態窒素)micro-KJELDAHL変法を用いて分析した。

乾性ポドゾル土壌については粘土鉱物組成、酸化鉄、酸化アルミニウムの含量を野呂川越地形カテナにおいて分析した。

粘土鉱物組成分析：常法により過酸化水素水を用いて有機物を分解したのち、沈定法により 2μ 以下の部分を採取し、粘土部分の試料とした。粘土鉱物の同定はX線回析(理学電気製のX線回析装置を用いた)により判定した。回析線の同定に際しては Brown(1961)、須藤(1974)、松井(1971)の方法を参照した。

鉄(Fe_2O_3)、アルミニウム(Al_2O_3)分析：Mehra-Jackson法とTamm法による浸出液を原子吸光分光分析により測定した。

未熟土の腐植の形態はポドゾルや暗色系褐色森林土と比較するため、Lowe-Kumada法(1984)により測定し、その結果は Kumada et al. (1967)、熊田(1977)による腐植酸分類ダイヤグラムを使って解析した。

土壌物理性分析：400ccの採土円筒を用いて採取した試料を「環境測定法IV—森林土壌」(1976)に従い分析した。その際真比重は空気比較式比重形を用い測定し、孔隙解析は真下(1961)の方法に従った。

森林伐採による土壌の物理性の変化を400cc採土円筒試料を用いて実験的に検証した。土壌は高原山の調査地から採取し、(1)飽水状態の 5°C でincubation、(2)飽水状態の 25°C でincubation、(3)アカマツ林の土壌表層に自然状態で放置、(4)裸地の土壌表層に自然状態で放置した4条件で月1回の割で円筒上部の空隙、飽水時全量、素焼板を使った脱水時全量を6か月間測定した。

第2項 植生の調査法と解析法

微地形を測定した $10\text{m} \times 10\text{m}$ の方形区で毎木調査を行い、2m以上の樹木の樹高と胸高直径を測定した。天然更新状態を調べるために $10\text{m} \times 10\text{m}$ の中に任意に3つの $2\text{m} \times 2\text{m}$ の小方形区をもうけ優占種の稚樹を測定した。小方形区ではBraun-Blanquet法により林床植生の種組成と優占度も調査した。これらの測定値は平均値として樹高、胸高直径、平均胸高断面積合計を計算した。前田・宮川(1970)による方法で林床型分類を行った。森林全層群落、林床群落を評価するために平均多様性と全多様性を計算した。用いた式は

平均多様度(H')は：

$$H' = 3.3219 (1.0 \log_{10} N - 1 / N \sum n_i \log_{10} n_i)$$

(Lloyd & Ghelardi 1964)

但し、本研究では n_i ：i種の優占度、 N ：総合優占度、を用いた。

全多様度(TH')は：

$$TH' = H' \times N$$

(Pielou 1966)

として計算をおこなった。

第3節 調査地の概要と各調査地での研究目的

調査を行った場所は栃木県高原山、長野営林局三浦実験林、屋久島、上高地、赤石山脈とアメリカ合衆国オレゴン州アンドリュース実験林で、各調査地の位置を図2-3-1に示す。

1. 栃木県高原山

栃木県北部の高原山東南面、標高470 m - 550 mに調査地は位置する。この高原山は釈迦が岳(1795 m)を最高部とし、長大な斜面をもった火山性山地と比較的開析の進んだ火山性丘陵地に区分される。この地域の基盤は立室花崗岩類、天頂石英斑岩、中新世塩谷層群、丸山流紋岩、寺山石英粗面岩、および宮川流紋岩からなっている。これらの基盤の上に火山錐を構成する安山岩類と火砕物が累重し、さらに関東ローム層がひろく覆っている。

褐色森林土が優占し、緩傾斜地や平坦地の厚い火山灰の堆積地では黒色土が分布する。

近くの矢板市(標高205 m)の気温は年平均12.7°C、最高が8月で24.8°C、最低が1月で2.1°Cを示し、年間降水量は1385 mm(7月最大、1月最小)である。

この地域では人工林と二次林が優占的であり、調査地はスギ、ヒノキの人工林からなり、1979年4月に伐採された。

調査は1地形カタナについて54地点で行った(図2-3-2)。

この調査地に隣接するヒノキ47年生林で60 m×60 mの調査区を設けて、単位区の面積を変えた時の単位区から導かれる微地形特性値を測量した。

ここでの研究の目的は、

- (1) 1地形カタナにおける微地形を数値分類し、地形図上に微地形単位を図示し、その分布を明らかにする。
- (2) 褐色森林土の諸特性と地形単位、微地



図2-3-1 各調査地の位置図

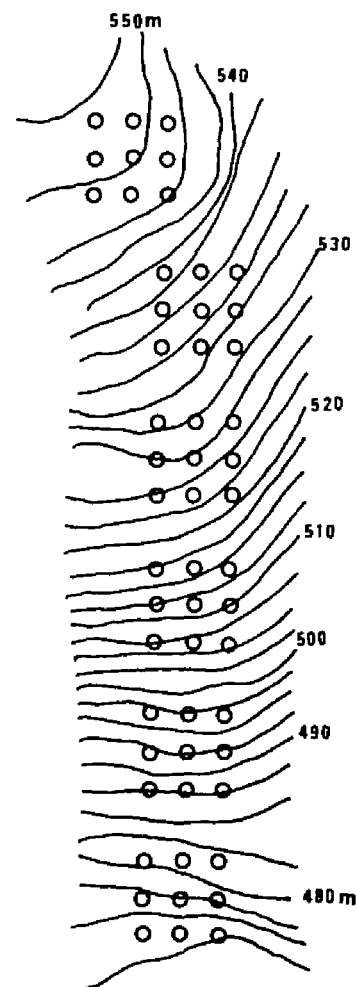


図2-3-2 栃木県高原山における調査地、実線は等高線、○：調査地点

形特性値の関係を明らかにする。

- (3) 造林木の成長と微地形特性値との関係を明らかにする。
- (4) 土壌と微地形の関係を地形関数として数式化し、総合的な解を検討する。
- (5) 単位区から導かれる微地形特性値と単位区の面積との関係を検討する。
- (6) 調査地のヒノキ、スギ47年生の伐採が行われ、このインパクトが土壌に及ぼす影響を微地形ごとに明らかにする。

2. アメリカ合衆国オレゴン州アンドリュース実験林
オレゴン州ユージンから東へ約80 km、カスケード山脈にあるアンドリュース実験林は北緯44°14′、西経122°11′に位置し、標高は425 mから1620 mにわたる。調査地の地形は高位段丘面から沢にかけた683 m~733 mの標高で氷成堆積物が横たわり、土壌はU.S. TaxonomyのCryumbreptグループに分類される。

気候は温暖で夏期は乾燥し、冬期は温暖湿潤である。年間降水量は2500 mmを越し、冬に集中する。6月~8月は無降雨または寡雨の日が続く。1月の平均気温2°C、7月では20°Cを示す(Berntsen 1959, Halpenny et al. 1984)。

ここの針葉樹天然林は *Pseudotsuga menziesii* (平均樹高56 m, 平均胸高径120 cm, 密度43本/ha)、*Tsuga heterophylla*

(平均樹高37 m, 平均胸高径60 cm, 密度84本/ha)、*Thuja plicata* (平均樹高35 m, 平均胸高径75 cm, 密度49本/ha)から構成されていた。*Pseudotsuga menziesii* が樹齢約490年で優占し、亜高木層を *Tsuga heterophylla*, *Thuja plicata* が構成していた。1985年6月に皆伐が行われた。

調査は高位段丘から沢にかけた1地形カテナで行われ、70地点の微地形と54地点の土壌を調べた(図2-3-3)。また皆伐が土壌に及ぼす影響についても、1985年5月の伐採前と8月の伐採後に調査した。

ここでの研究の目的は、

- (1) 高位段丘からの1地形カテナの微地形を区分する。
- (2) 天然針葉樹林の伐採、搬出に伴う土壌の変化を微地形別に明らかにする。

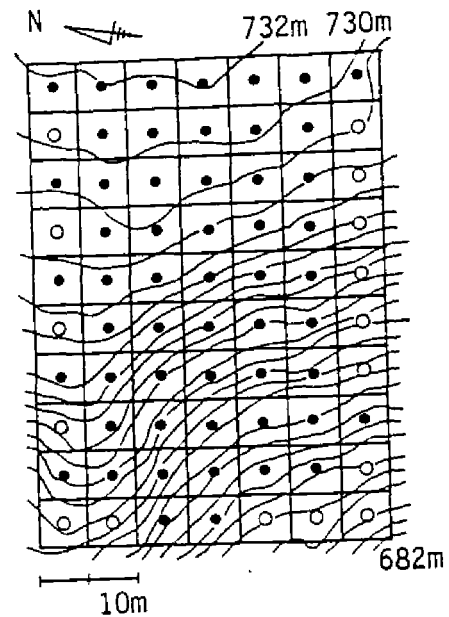


図2-3-3 アメリカ合衆国オレゴン州カスケード山脈に位置するアンドリュース実験林内の調査地。上部緩傾斜地は高位テラス (●: 微地形と土壌調査、○: 微地形調査)

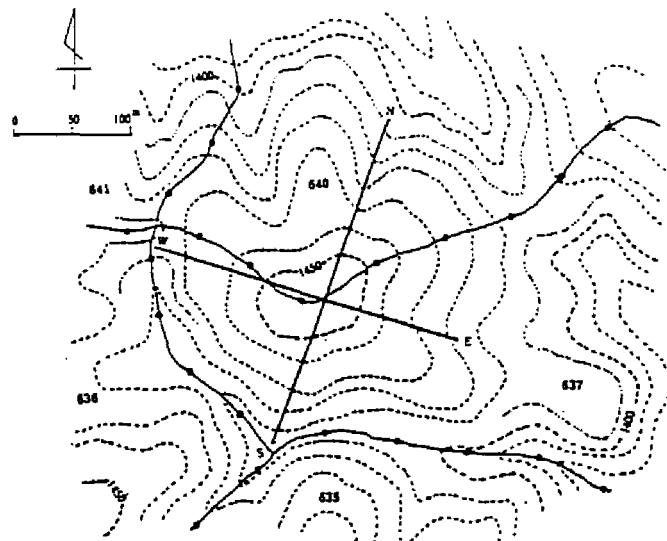


図2-3-4 長野営林局三浦実験林内の第637、640林班の調査地。コンター間隔は10m、ヒノキ造林

- (3) 微地形に関連して土壌の変化が形態的、強度的にどの様に生じたかを検討する。

3. 長野県三浦実験林

王滝川上流域の実験林を含む三浦国有林は隆起準平原に位置し、表層地質は濃飛流紋岩で緩傾斜地では埴質、緻密な土壌が生成されやすい。木曾谷の気候は全般に湿潤な傾向が強い。三浦ダムの観測によると、年間降水量は3450mm、年平均気温は7°Cでとくに準平原地域では水過剰になっている。

自然植生はヒノキ・チマキザサ群落でヒノキ天然生林は濃飛流紋岩地帯に多く、安山岩・玄武岩等の地帯はサワラ・ダケカンバの林が多い。湿性鉄型ポドゾルが広く分布する(三浦実験林調査中間報告書 1986)。

調査地は昭和34年の伊勢湾台風、昭和36年の第2室戸台風により風倒被害が発生したため伐採されヒノキ造林地となっている。

調査は同一尾根から東西南北方向に4つの地形カテナにおいて、51地点で行った(図2-3-4)。

ここでの研究の目的は、

- (1) 同一尾根から谷に向けた4つの地形カテナで微地形を区分し、相互の分布を比較する。
- (2) これらの微地形に対応した湿性鉄型ポドゾルの出現パターンと土壌特性の関係を明らかにする。
- (3) 風倒跡地の土壌は未熟土として残っており、どのような微地形に主に風倒被害が起こったかを検討する。
- (4) 造林木(ヒノキ)またチマキザサの成長と微地形との関係を明らかにする。

4. 屋久島

屋久島の海岸線は断崖或は砂浜で標高10m-100mに段丘が発達し、1000m-1300mで比較的峻険な傾斜となり、頂上付近は花崗岩地帯に特有な緩慢な起伏が見られる。海岸線の環状に分布する中生層と推定される粘板岩、砂岩、礫岩を貫いて粗粒黒雲母花崗岩が島の中央部の山地を形成し、調査地はこの地帯に含まれる。この花崗岩は正長石、黒雲母石英の巨大班晶からなるのが特徴である。

気候は海岸林地帯では冬期積雪を見ず、年平均気温20°C、年間降水量3000mm-4000mmである。これに比較し、調査地の一つに近い下屋久宮林署小杉谷事業所(標高640m)においては、1961年-1965年の観測から年平均気温13.4°C、年間降水量は6820mm、湿度は77.8%であった。年間降水量が非常に多く、空中湿度が年間を通して高いのが特徴的である。

調査地の植生はタカサゴシダースギ群集で一部ヒメヒサカキースギ群集の分布域に達している。スギの天然林がいずれも優占する。

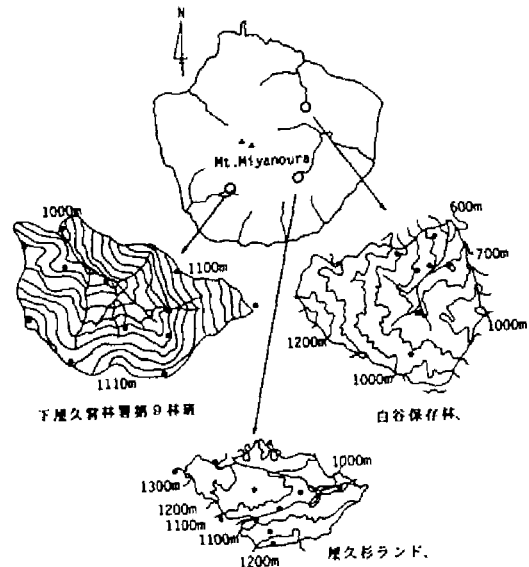


図2-3-5 屋久島(白谷保存林、屋久杉ランド、下屋久宮林署第9林班)の調査地と調査地点。各調査地はそれぞれ白谷川、安房川、瀬切川上流域に位置する。

高原山と同じ褐色森林土が主に分布するが、この調査地は花崗岩母材であり、スギ天然林である点が相違する。調査は白谷保存林(標高600m-1300m)、屋久杉ランド(標高1000m-1300m)、下屋久営林署第9林班(標高1000m-1160m)の3カ所、27地点で行った(図2-3-5)。

ここでの研究の目的は、

- (1) 地域を異にする調査地で同一組の微地形特性値を用いて微地形単位を区分する。
- (2) 花崗岩母材の褐色森林土の諸性質と微地形特性値、単位との関係を明らかにする。
- (3) スギ天然林構造、林床植生と微地形の関係を明らかにする。
- (4) スギの天然更新状態と微地形との関係を明らかにする。

5. 長野県上高地

飛驒山脈の南部地域を構成する槍ヶ岳(3180m)から焼岳(2455m)までの西の主峻と大天井岳(2922m)から蝶ヶ岳(2664m)を経て霞沢岳(2646m)の東の山稜に囲まれた流域は谷底の広い縦谷をなしている。満壮年期の高山性山地で気象条件の厳しいこ

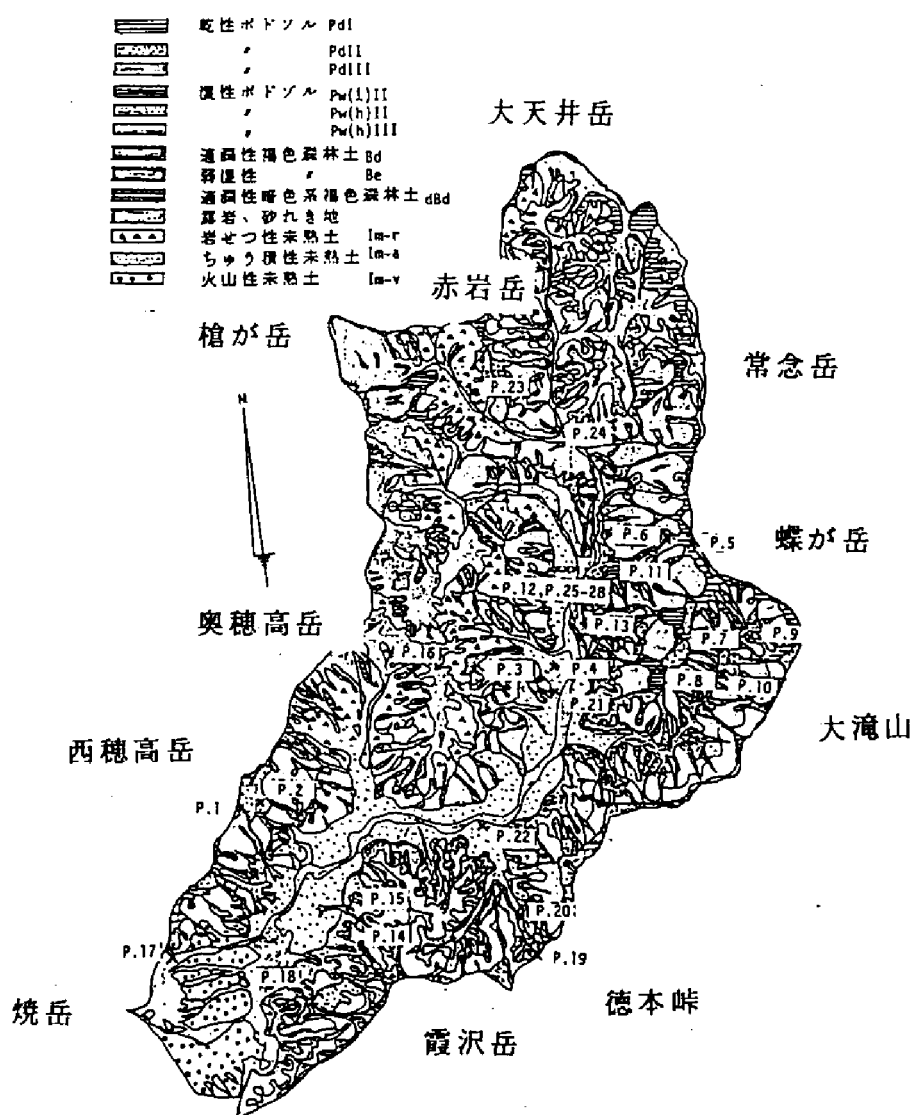


図2-3-6 上高地の土壌図(小林・加藤、1983年作成)と調査位置

の流域は土砂生産が恒常的に行われ、兩岸に扇状地形が発達してきた。調査地域は標高に1500 m以上の差があるため、地形は一般に急峻であり、傾斜30°以上の急斜地が地域の70%以上を占め、15°未満の平坦地は約20%にすぎない(上高地地域森林保全整備計画書 1983)。

気温は山岳に囲まれているため年較差及び日較差が大きい。大正池での1960年までの25年間では年平均気温5.1°C、年降水量2637 mmとなっていた(上高地国有林 1976)。積雪量は最高2 m前後であるが、カール地形においては吹きだまりを生じ、これが全層雪崩となり土砂移動を促している。

西部主稜では西穂高岳をつくる角閃ひん岩と石英モンゾニ岩、及び焼岳の噴出物の角閃安山岩からなっている。前穂高岳の東斜面では北アルプスの中心部を構成する黒雲母花崗岩がその末端を南下させ梓川に達している。一方東部山稜は主に秩父古生層の砂岩、粘板岩、チャート等によって構成されている。梓川沿岸の谷底低地には周囲の山地から供給された沖積性の新しい河床礫層が帯状に横たわっている。

寒冷多湿の気候下で土壌はポドゾル化を受け易く、ポドゾルの分布(47%)が広く、褐色森林土(13%)は狭い。また急峻な地形と火山噴出物、安山岩などの脆弱な地質が多いため未熟土、岩屑土(41%)なども多い。

植生は梓川沿岸の平底低地ではヤナギ林、カラマツ林、ハルニレ林が成立し、標高1900 m-2200 mではコメツガ、シラベ、アオモリトドマツの亜高山針葉樹林が優占する。標高2200 m-2600 mの高山帯でハイマツ低木林また下部ではミヤマハンノキ、ナナカマドなどの高山低木林から成る。2600 m以上ではコケ、草本類が点在し、無植生地も多い。

調査は31カ所で行い、土壌図を作成した(図2-3-6)。ここでの研究の目的は上高地を特徴付け、しかも分布域の広い生成要因の違う未熟土を微地形と母材の生成要因から関連付け、分類を試みる。

- (1) 微地形を数値分類し、未熟土と微地形の関係を明らかにする。
- (2) 未熟土の諸性質を明らかにし、母材供給過程と微地形の関係から分類を行う。
- (3) 各土壌に成立する森林、植生と微地形の関係を明らかにし、森林成立過程について検討を行う。

6. 赤石山脈

赤石山脈は南北方向の地質構造に支配されて山稜は南北に延びている。一つの主稜は甲斐駒ヶ岳(標高2966 m)から仙丈ヶ岳(3033 m)、塩見岳(3046 m)、赤石岳(3120 m)、を通過して光岳(2591 m)に続き、もう一つの主稜は北岳(3192 m)、農鳥岳(3025 m)から布引山(2583 m)に続く。調査地は光岳から北沢峠までの北緯35°20'-35°45'に位置し、標高は1500 m-2800 mの間にあり、野呂川上流域、大井川上流域にあたる。

地質は主に四万十活動による変成を受け、ほぼ南北の走向で帯状に並ぶ古生層と中生層およびその変成岩が主体をなし、これを貫く花崗岩と第三紀層が一部を構成している(水谷 1967)。中・古生層は粘板岩・砂岩を主体とし、チャート・輝緑凝灰岩・石灰岩を混成する。山地の岩礫はその場で十分風化作用を受けて細粒化することなく、斜面に沿って移動するので土層中に含まれる礫は多い。また火山灰の覆った地域は少なく、土壌母材はかなり均質で特異性がない。

気温は北アルプスと比較すると高めで、積雪量は比較的少ない。年平均気温は標高2700 m

で推定 0°C 、標高 2000m で $4-5^{\circ}\text{C}$ とされ、年降水量は標高 2700m で 2000mm 、標高 2000m で 2600mm と推定される(奥大井地域森林開発保全調査 1976)。風上斜面である西斜面に一般に雨が多く、湿度は西北斜面が高いと言われている。

標高 $1500\text{m}-1800\text{m}$ では針広混交林がみられ、 $1800\text{m}-2700\text{m}$ 付近までアオモリトドマツ、シラベ、トウヒ、コメツガ、ダケカンパからなる亜高山針葉樹林を形成している。 2700m では高木限界となり、高山帯に移行する。高木限界は北アルプスで 2500m と、赤石山脈の方が 200m 高い。これらの地域から81地点の微地形、土壌、植生を調査した(図2-3-7)。ここでの研究の目的は、

- (1) 14地形カテナと単独の調査地を含めた81地点で広範囲な亜高山帯の微地形の分類とそれらの微地形特性値を明らかにする。
- (2) この調査地域で主体をなす乾性ポドゾルを中心に各土壌型の分布パターンと微地形との関係を明らかにする。
- (3) 乾性ポドゾルを特徴付ける粘土鉱物組成、鉄、アルミニウムについて微地形との関係を検討する。
- (4) この地域の亜高山針葉樹林の森林構造、林床型、植物群落の多様性、天然更新状態と微地形の関係を検討する。

本研究では以上の6カ所の調査地を選定した。微地形の数値分類のために1地形カテナから17以上の複数の地形カテナを含む対象

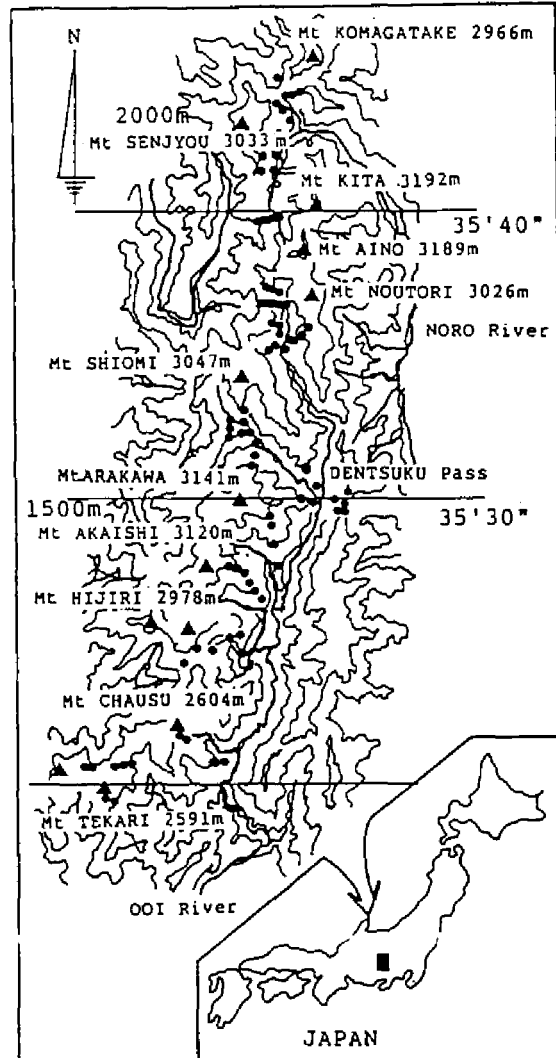


図2-3-7 赤石山脈における調査地点。大井川、野呂川の上流域に位置する。

表2-3-1 調査地の標高、土壌、母材、植生

調査地名	地形カテナ	標高	土壌	母材	植生
栃木県高原山	1地形カテナ	470m - 550m	褐色森林土	火山灰	ヒノキ・スギ人工林
三浦実験林	同頂4地形カテナ	1400m - 1458m	湿性ポドゾル	凝灰流紋岩	ヒノキ人工林
屋久島	多数地形カテナ	600m - 1300m	褐色森林土	花崗岩	スギ天然林
上高地	多数地形カテナ	1500m - 3000m	未熟土	火成岩、鉄父古生層	亜高山針葉樹
赤石山脈	多数地形カテナ	1500m - 2800m	乾性ポドゾル	片岩	亜高山針葉樹林
アンドリュース実験林	1地形カテナ	683m - 733m	Crymbrept	氷河堆積	ダグラスファー天然林

地域まで面積を拡大して調査を行った。また褐色森林土、乾性ポドゾル、湿性ポドゾル、未熟土を調査の対象とした。母材は火山灰、火成岩、変成岩などにわたり、また植生も天然林、人工林を選択した。それぞれの調査地の環境条件については表2-3-1にまとめ、研究の目的につい

ては表2-3-2にまとめた。

第4節 要 約

1. 調査の対象は、尾根から谷にかけた地形カテナ上での微地形とした。地形カテナから導かれる10の微地形特性値は地形図上の(X_n 、 Y_n 、 Z_n)から全て計算される。単位区(10 m×10 m)から導かれる12の微地形特性値はコンパス測量により実測を行なう。

2. 微地形は上記の方法で数値記載され、主成分分析により分類する。

3. 微地形調査とともに土壌と植生の調査を行ない、土壌の物理化学性を分析した。

4. 調査は栃木県高原山、長野営林局三浦実験林、屋久島、上高地、赤石山脈とアメリカ合衆国オレゴン州アンドリュース実験林の6カ所で行なった。

表2-3-2 各調査地での研究のねらい

調査地	各調査地での研究のねらい
栃木県高原山	微地形の数値分類、褐色森林土との関係、造林木の成長、森林伐採による土壌の変化単位区から導かれる微地形特性値の検討
三浦実験林	微地形の数値分類、湿性ポドゾルとの関係、造林木の成長
屋久島	微地形の数値分類、褐色森林土との関係、スギ天然林及び林床植生との関係
上高地	微地形の数値分類、未熟土との関係、亜高山針葉樹林、林床植生及び天然更新
赤石山脈	微地形の数値分類、乾性ポドゾルとの関係、亜高山針葉樹林、林床植生及び天然更新
アンドリュース実験林	微地形の数値分類、伐採による土壌の変化

第3章 微地形の数値分類と微地形特性値の特徴

第1節 微地形の数値分類

微地形の分類単位は Dalrymple ら(1968)の単位を応用した。この分類の特徴は傾斜や単位の形—平面 (facet) や凹凸の曲面 (segment) などの形態と、表層物質の移動とにより微地形を区分している。しかし形態区分は定性的であるため本論では数値記載に基づく数値分類を試みた。

対象とする微地形は田村(1980)が試みた地形分類体系試案の最小単位にあたる単位区 (100 m²) をもって扱い、地形カテナを微地形単位で区分した。これにより微地形は小地形—中地形—大地形へと高次の分類体系へ対応付ける最も低次の基礎を提示するという意義を持つ(熊木、羽田野 1982)。

本研究では区分された単位を成因で命名し、形態と斜面の構成物質の関係から定義し分類単位を表わした。Dalrymple らの9つの単位が形態と形成営力を基準に置いているため、これら9つの単位を適用するが、各単位の名称には往々成因的な名と形態的な名が用いられているため整理して成因としての名前で統一した。また田村(1974)の水と土壤の動態と地形変化を用いた定義も併せて各微地形の定義とした。以下は微地形単位の名称と定義である。

1. 残積斜面—Interfluvium: 分水嶺となっており、一般に緩傾斜凸型を呈し、水は鉛直浸透する。土壤は時に匍行し、斜面の従順化がある。初期土壤生成が行なわれる。
2. 浸潤斜面—Seepage slope: 緩傾斜でやや凸型、表層の沈降、水の鉛直浸透と中間流の側方移動、側方や垂直への土壤の移動があり斜面の従順化が起こる。
3. 匍行斜面—Convex creepslope: 急傾斜で顕著な凸型を呈し、中間流がある。側方洗脱、重力による土壤の匍行が顕著である。
4. 自由斜面—Fall face: 傾斜が安息角度を越える。地表流が起こり母材が露出して物理化学的風化を受ける。表面侵食や斜面崩壊が起き、直線状斜面の維持がなされる。
5. 運積斜面—Transportational midslope: やや急傾斜で凹凸型を示す。活発な表面侵食、マスムーブメント、物質の下方斜面への運積、移動が行なわれる。
6. 崩積斜面—Colluvial footslope: やや緩傾斜で直線的な面を呈するものもある。中間流があり、側方浸潤、側方洗脱が起こる。表面侵食、崩積物の再堆積が主となり、物質移動が主過程の場合は5になる。
7. 沖積斜面—Alluvial toeslope: 緩傾斜となり直線的な面を呈する。水みち流があり、水みち侵食も起こる。上部斜面からでなく上部谷からの河川による沖積物の再堆積により平底斜面の形成が行なわれる。
8. 溶食斜面—Channel wall: 河壁をなし、遷急線により7と区別される。溶食や斜面崩壊と水路壁の後退が起こる。
9. 洪涵斜面—Channel bed: 定期的な増勾作用と溶食が行なわれ、表面流水による下方谷への物質の移動と水路底の低下が起こる。

微地形を区分する上での対象範囲を地形カテナと考え、高原山とアンドリュース実験林で1地

地形カテナを詳細に記載し、数値分類を行った。次に三浦実験林で同じ尾根に続く4つの地形カテナについて微地形の数値分類を行い、さらに屋久島、上高地、赤石山脈で複数の地形カテナについて数値分類を行い、微地形特性値と微地形単位を検討した。

第1項 1 地形カテナについての分類

栃木県高原山では地形カテナの相対高、相対長を除き、標高は排水高で表し、19の微地形特性値を用いて1地形カテナ54地点の記載を行った。

主成分分析の結果は第3主成分(Z3)までの固有値が1以上となり総合特性値と考えられた(表3-1-1)。また第3主成分までにもとの微地形特性値が81.5%(累積寄与率)表現されていた。因子負荷量から第1主成分は地形カテナの特性値-位置と傾斜が主に表現され、第2主成分は単位区からの特性値-形態が表現されていた。因子負荷量を2乗の分散が最大になるように軸を回転させる(規準バリマックス回転)と、回転後の因子負荷量により、主成分の総合する微地形特性値がより明瞭になった。

第1主成分は地形カテナから導かれた特性値を、第2主成分は単位区から導かれた特性値を強く表現していた。第3主成分は寄与率が9.8%と小さいが、単位区から導かれた起伏指数、線型性、排水面積を表現した。

全体の特性値の71.7%を表現している第1主成分と第2主成分を用いたスコア散布図から微地形は7つのグループに区分された(図3-1-1)。第1グループと第2グループは第1、第2主成分とも負の値を示した。第1グループの主成分値は絶対値で第2グループのそれよりも大きく、2分された。これらは地形カテナの上部に位置し、ほぼ平面をなしていた。第2グループは相対傾斜が急であった。第3グループと第4グループは第1主成分が負で第2主成分が正の値を示した。第3グループは第4グループよりも第1主成分の絶対値が大きく2分された。ともに凸型で排水面積が広く急傾斜であるが、しかし第3グループは地形カテナ上で上部に位置していた。第5グループは第1、第2主成分とも正の値を示し、急傾斜で表面曲率も高く排水面積も広がった。第6グループと第7グループは第1主成分が正で第2主成分が負の値を示し、他のグループから区分された。第7グループは第6グループに比較して、第1、第2主成分の絶対値が大きくさらに区分された。第7グループは斜面下部に位置し、凹型で広い集水面積を示した。

以上から第1グループを残積斜面、第2グループを浸潤斜面、第3グループを匍行斜面(1)、第4グループを匍行斜面(2)、第5グループを運積斜面、第6グループを崩積斜面、第7グループを

表3-1-1 高原山における19の微地形特性値による主成分分析の結果(微地形特性値の記号は表2-1-1による)

微地形特性値	主成分 Z1		主成分 Z2		主成分 Z3	
	固有ベクトル	因子負荷量	固有ベクトル	因子負荷量	固有ベクトル	因子負荷量
1 MCR	.31	.95(.98)*	.01	.02(-.12)	.17	.24(-.13)
2 MDI	-.31	-.95(-.98)	-.01	-.02(-.12)	-.17	-.24(-.13)
3 MCL	.32	.96(.96)	.07	.15(-.25)	.15	.20(-.10)
4 MDL	-.31	-.95(-.95)	-.08	-.17(-.27)	-.14	-.20(-.08)
5 MCS	.32	.96(.92)	.11	.22(-.36)	.10	.13(-.14)
6 MDS	.15	.47(.61)	-.35	-.73(.71)	.21	.28(-.32)
7 MRR	.29	.86(.92)	-.16	-.33(-.24)	.19	.26(-.28)
8 AZI	.24	.72(.88)	.03	.07(-.32)	-.10	-.14(-.32)
9 USU	.27	.81(.85)	.21	.44(-.69)	-.13	-.17(-.28)
10 USL	-.07	-.21(-.09)	-.44	-.92(-.97)	.08	.11(-.27)
11 USLE	.08	.25(-.05)	-.10	-.20(-.19)	-.60	-.82(-.97)
12 USR	.08	.25(.72)	-.16	-.33(.64)	.31	.42(-.24)
13 URI	.22	.66(.56)	-.31	-.64(.38)	-.10	-.13(-.73)
14 USC	.20	.60(.42)	.35	.73(-.90)	-.12	-.17(-.06)
15 URL	.22	.65(.68)	-.25	-.53(.37)	-.05	-.07(-.63)
16 UCL	.14	.42(.24)	-.22	-.46(.11)	-.24	-.33(-.96)
17 UCA	.23	.69(.38)	-.06	-.12(-.30)	-.36	-.49(-.87)
18 UDA	-.12	-.35(-.09)	.32	.68(-.37)	.29	.40(-.92)
19 URS	-.19	.58(.41)	.36	.76(-.90)	-.12	-.17(-.05)
固有値	9.20		4.42		1.87	
寄与率	48.4		23.3		9.8	
累積寄与率	48.4		71.7		81.5	

*:()内は規準バリマックス回転後の因子負荷量

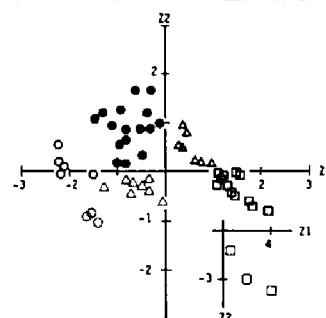


図3-1-1 高原山における19の微地形特性値を使った主成分分析による第1主成分と第2主成分のスコア散布図

(○：残積斜面、△：浸潤斜面、○：匍行斜面(1)、●：匍行斜面(2)、△：運積斜面、□：崩積斜面、□：沖積斜面)

沖積斜面に区分した。

区分した微地形単位別の形態を検討する（表 3-1-2）と、残積斜面は集水高が 1.9 と最小で、地形カタナの最上部に位置し、微凸型（起伏指数は -1.00）緩傾斜（相対傾斜は 9.7）であった。それに続く匍行斜面(1)は典型的な凸型で排水面積は広く、相対傾斜は 15.2 とそれほど急ではなかった。浸潤斜面がこれに続き（集水高は 10.8）、ほぼ平面（起伏指数は -0.54）を示し、集水面積と排水面積がほぼ等しかった。匍行斜面(2)は匍行斜面(1)と形態は似ているが地形カタナ上で下部に位置

表 3-1-2 高原山における微地形単位別の微地形特性値

微地形 特性値	微地形単位						
	沖積 斜面	崩積 斜面	直積 斜面	匍行 斜面(2)斜面	浸潤 斜面	匍行 斜面(1)斜面	残積 斜面
MCH	64.9	51.9	38.7	21.1	10.8	3.0	1.9
MDH	1.7	14.7	27.9	45.5	55.8	63.6	64.7
MCL	117.0	100.1	84.1	57.0	34.4	16.5	11.3
MDL	11.3	25.3	40.0	68.4	92.7	110.8	113.1
MCS	29.0	27.3	24.4	20.1	17.0	10.2	9.7
MDS	-9.0	-28.0	-34.7	-33.9	-31.1	-30.0	-30.0
MRL	20.0	-0.7	-10.3	-13.9	-14.1	-19.8	-20.3
AZI	270	270	270	242	219	207	255
USU	36.3	34.1	36.3	28.8	27.5	11.0	8.7
USL	-9.0	-34.0	-37.1	-34.4	-28.4	-21.2	-10.3
USLE	3.7	-1.5	2.4	-4.7	1.0	-5.0	0
USR	-1.3	2.8	-7.9	-9.8	-2.9	-4.6	-2.3
URI	9.44	0.18	-1.77	-4.17	-0.54	-4.07	-1.00
USC	1.140	1.214	1.258	1.194	1.134	1.052	1.016
URL	27.3	0.1	-0.9	-5.7	-0.9	-10.2	-1.0
UCL	1.7	1.3	-5.4	-14.5	-1.9	-9.6	-2.3
UCA	52.6	46.7	40.5	37.4	38.7	28.3	33.8
UDA	29.6	44.0	53.6	51.0	44.5	50.4	42.3
URS	22.7	34.3	37.0	31.8	28.1	15.2	9.7

し、相対傾斜が 31.8 とより急傾斜を示した。運積斜面は匍行斜面(2)に続くが、この間に露岩のある狭い急傾斜地があり、微地形変換地点を経て地形カタナ上で中腹部に位置していた。この運積斜面は最も急傾斜（37.0）で微凸型を示し、表面曲率は最も高かった。この微地形単位まで排水面積の割合が集水面積に比較して高い値を示していた。続く崩積斜面は微凹型で急傾斜となり、排水面積が集水面積に比較してやや広くなった。地形カタナの最下部に位置する沖積斜面は最も凹型（起伏指数は 9.44）を示し、上部に対して急傾斜、下部に対して緩傾斜であった。集水面積が排水面積に比較して最も広かった。

表 3-1-3 高原山での地形カタナと単位区から導かれた微地形特性値の相関行列

特性値	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1MCH	1.00																		
2MDH	-.99	1.00																	
3MCL	.98	-.98	1.00																
4MDL	-.98	.98	-.99	1.00															
5MCS	.95	-.95	.97	-.97	1.00														
6MDS	.49	-.49	.39	-.35	.32	1.00													
7MRL	.88	-.88	.82	-.80	.79	.82	1.00												
8AZI	.69	-.69	.70	-.73	.67	.15	.49	1.00											
9USU	.69	-.69	.77	-.77	.84	.01	.51	.52	1.00										
10USL	-.19	.19	-.30	.31	-.39	.57	.12	-.13	-.58	1.00									
11USLE	.08	-.08	.07	-.06	.09	.11	.13	.33	.19	.03	1.00								
12USR	.29	-.29	.22	-.22	.19	.33	.32	-.03	-.02	.12	-.32	1.00							
13URI	.54	-.54	.47	-.45	.45	.71	.72	.40	.36	.46	.37	.33	1.00						
14USC	.51	-.51	.61	-.62	.68	-.28	.22	.13	.88	-.81	.08	-.11	.00	1.00					
15URL	.54	-.54	.50	-.49	.48	.65	.70	.43	.44	.46	.25	.11	.91	.07	1.00				
16UCL	.32	-.32	.25	-.24	.24	.38	.38	.25	.13	.13	.56	.59	.59	-.02	.29	1.00			
17UCA	.52	-.52	.53	-.53	.55	.22	.47	.46	.57	-.11	.41	.10	.54	.43	.49	.44	1.00		
18UDA	-.21	.21	-.15	.14	-.14	-.50	-.40	-.19	-.04	-.46	-.38	-.21	-.64	.23	-.55	-.51	-.70	1.00	
19URS	.50	-.50	.60	-.61	.70	-.30	.22	.37	.89	-.88	.09	-.08	-.04	.95	.00	.01	.40	.22	1.00

微地形特性値間の相関を検討したところ地形カタナから導かれた特性値相互の間に排水傾斜を除き ± 0.8 以上の高い相関を示した（表 3-1-3）。単位区から導かれた特性値では表面曲率と相対傾斜が上・下方傾斜に ± 0.8 以上、縦断線型性と排水面積が起伏指数に相関を示した。単位区からの特性値と地形カタナからの特性値相互の間には方位、上方傾斜、起伏指数、表面曲率、縦断線型性、集水面積、相対傾斜が排水傾斜を除く地形カタナからの特性値に相関を示した。地形カタナから導かれた特性値は微地形の地形カタナ上での位置関係を表現し、単位区から導かれた特性値は微地形の形態を主に表わしている。両者の特性値相互の間に相関があるということ

は特定の形態を示す微地形が地形カテナの特定の位置に分布すると考えられる。

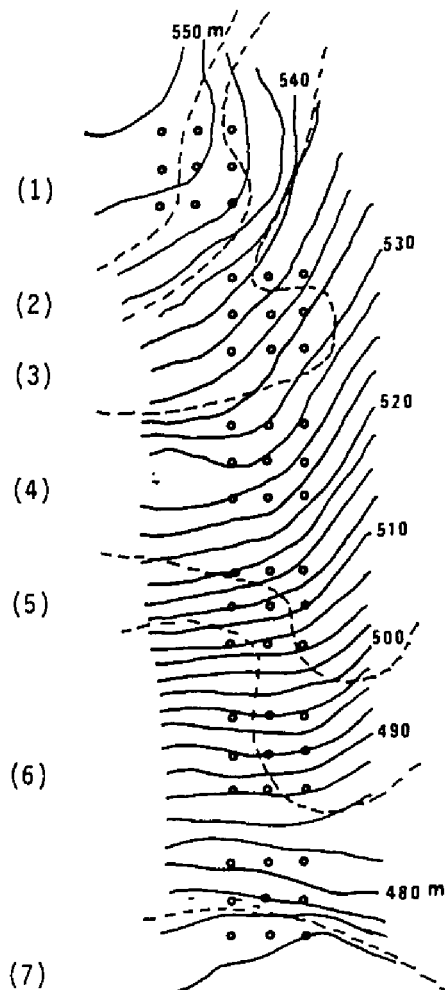


図3-1-2 高原山における調査地点と数値分類した微地形単位の区分図（1：残積斜面、2：匍行斜面(1)、3：浸潤斜面、4：匍行斜面(2)、5：運積斜面、6：崩積斜面、7：沖積斜面、点線は微地形の区分界、実線は等高線、○：調査地点）

主成分分析の結果は第3主成分の固有値が1.91で総合特性値を表し、77.0%の微地形特性値を表現していた（表3-1-4）。因子負荷量から第1主成分は地形カテナからの微地形特性値を、第2主成分は単位区からの微地形特性値をそれぞれ表していた。規準バリマックス回転後の因子負荷量によると、この傾向はより明瞭であった。また第3主成分は寄与率が10.1%と小さいが、単位区から導かれた排水傾斜、左方傾斜、方位を表現した。

全体の特性値の66.9%を表現している第1主成分と第2主成分を用いたスコア散布図から、残積斜面、浸潤斜面、匍行斜面(1)、運積斜面(1)、運積斜面(2)、匍行斜面(2)、崩積斜面の

区分した微地形の分布は地形図の等高線とは異なった境界を示した（図3-1-2）。これによると単位区を用いた地形カテナの微地形区分は有効であり、微地形の単位は斜面の広がりによって区分されていることが解る。また地形カテナにおいて必ずしも9つの全ての微地形単位が認められないこと、同じ微地形が地形カテナ上で相違する位置に分布する場合があることも認められた。

この調査地の微地形は集水高順に地形カテナの上部から残積斜面－匍行斜面(1)－浸潤斜面－匍行斜面(2)－運積斜面－崩積斜面－沖積斜面の出現序列を示した。先に定義した微地形の通常の出現序列に比較して匍行斜面(1)が浸潤斜面上部にあり、このような出現序列は地滑りや強度の侵食など地形形成作用または地形の発達過程での営力が特異に働いた結果と推測される。

同様にオレゴン州カスケード山脈にあるアンドリュース実験林の高位段丘から斜面下部にかけて微地形の区分を試みた。1つの地形カテナが対象であるが等高線に沿った面積が広い点が高原山と相違した。高原山と同じ19の微地形特性値を用いた。

表3-1-4 アンドリュース実験林における19の微地形特性値を用いた主成分分析の結果（微地形特性値の記号は表2-1-1による）

微地形 特性値	Z1		Z2		Z3	
	固有 ベクトル	因子 負荷量	固有 ベクトル	因子 負荷量	固有 ベクトル	因子 負荷量
1 MCH	.31	.92(.99)*	.09	.18(-.01)	.10	.14(.10)
2 MDH	-.31	-.92(-.99)	-.09	-.18(.00)	-.09	-.13(-.10)
3 MCL	.29	.88(.99)	.14	.29(.11)	.05	.07(-.05)
4 MDL	-.31	-.95(-.99)	-.08	-.16(.04)	-.00	-.00(.13)
5 MCS	.32	.95(.99)	.04	.09(-.11)	.07	.10(.03)
6 MDS	-.02	-.07(.01)	-.01	-.03(.01)	.38	.53(.99)
7 MRR	.28	.83(.88)	.03	.06(-.08)	.23	.33(.45)
8 USU	.31	.91(.87)	-.09	-.19(-.43)	-.03	-.04(-.20)
9 USL	-.27	-.82(-.88)	-.14	-.28(-.10)	.07	.10(.45)
10 USLE	.05	.15(.04)	-.35	-.70(-.94)	.31	.44(.32)
11 USR	.03	.08(.08)	.02	.04(-.02)	-.61	-.84(-.99)
12 UR1	.09	.27(.09)	-.44	-.87(-.99)	-.05	-.08(.08)
13 USC	.30	.90(.91)	.01	.03(-.19)	-.07	-.10(-.34)
14 URL	.08	.24(.14)	-.35	-.70(-.93)	.06	.08(.33)
15 UCL	.09	.27(.06)	-.39	-.78(-.95)	-.21	-.29(-.29)
16 UCA	.18	.53(.36)	-.34	-.68(-.88)	-.16	-.23(-.28)
17 UDA	-.01	-.04(.16)	.39	.78(.98)	.10	.14(.04)
18 UBS	.31	.92(.92)	.02	.04(-.19)	-.05	-.07(-.34)
19 AL1	-.08	-.25(-.48)	-.19	-.38(-.49)	.42	.59(.71)
固有値	8.77		3.93		1.91	
寄与率	46.1		20.6		10.1	
累積寄与率	46.1		66.9		77.0	

*:() 内は規準バリマックス回転後の因子負荷量

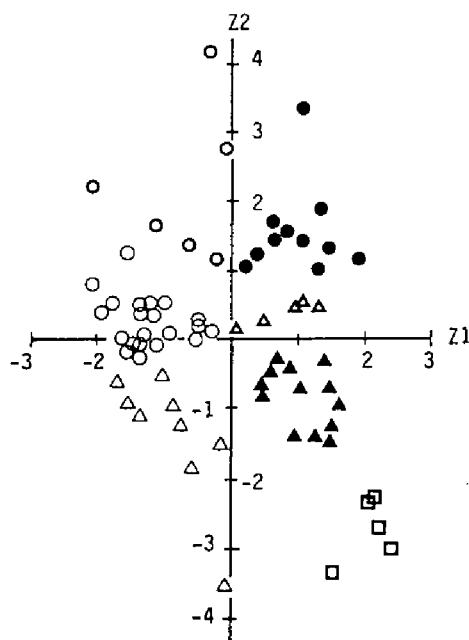


図3-1-3 アンドリュース実験林における19の微地形特性値を使った主成分分析による第1主成分と第2主成分のスコア散布図

(○：残積斜面、△：浸潤斜面、○：匍行斜面(1)、●：匍行斜面(2)、△：運積斜面(1)、▲：運積斜面(2)、□：崩積斜面)

調査区内で沖積斜面は区分されなかった。また地形カテナの下部に匍行斜面が区分されたことなど微地形単位の出現序列が高原山と相違した。この様に微地形単位の組合せと出現序列は地形カテナにより相違し、これは斜面の形成過程の違いを反映していると考えられる。

アンドリュース実験林の調査地では残積斜面にあたる微地形は高位段丘面であった。このような場合、地形分類上の高次の地形区分名を加えて、段丘残積斜面と表現すると、この微地形はより理解されやすくなる。

微地形特性値相互の相関を検討すると、地形カテナからの特性値は排水傾斜を除き相互に高い相関を示した。単位区からの特性値では上下方傾斜が表面曲率、相対傾斜に、起伏指数が縦断線型性、コンター線型性にそれぞれ相関を示した。地形カテナと単位区からの特性値間では上下方傾斜、表面曲率、相対傾斜が集水高などに高い相関を示すが、方位、起伏指数、縦断線型性は地形カテナの各特性値と相関を示さず、高原山と相違した(表3-1-6)。アンドリュース実験林ではある相対傾斜を持つ微地形が特定の地形カテナ上に分布するが、しかし微地形の凹凸面が繰り返し地形カテナ上に現れていると考えられる。

微地形の広がりを検討すると、区分した微地形はモザイク状の分布を示した(図3-1-4)。

7つを高原山と同様な方法で区分した(図3-1-3)。

区分した微地形別に特性値を平均した結果、残積斜面は微凸型で排水面積が広く、上方に緩傾斜、で下方に急傾斜で縦断線型性が最も凸型を示した。続く浸潤斜面は相対傾斜が最小で緩やかな微凹型の面を持ち、排水面積も最小であった。次いで最も凸型の面をもつ匍行斜面(1)は最も広い排水面積を示した。斜面中腹からは運積斜面(1)と運積斜面(2)となり、上下方傾斜が最大で表面曲率も高く、集水面積と排水面積がほぼ同じ割合を示した。上部に位置する運積斜面(1)は凸型面を、その下部の運積斜面(2)は凹型面を示すことで区分した。これらの下部に強い凸型面を示す匍行斜面(2)が位置し、下方傾斜が大きく排水面積が広い匍行斜面共通の特徴を示した。この地形カテナの最下部には、上方に向かって急傾斜で最も凹型の面を持ち、表面曲率も大きく、集水面積が最も広い崩積斜面になっていた(表3-1-5)。

表3-1-5 アンドリュース実験林における微地形単位別の微地形特性値

微地形特性値	残積斜面	浸潤斜面	匍行斜面(1)	匍行斜面(2)	運積斜面(1)	運積斜面(2)	崩積斜面
1 MCH	3.9	4.2	11.9	21.9	22.1	31.7	32.7
2 MDH	47.0	46.7	39.0	29.2	28.8	19.2	18.2
3 MCL	44.0	37.7	72.6	77.3	78.2	93.4	92.9
4 MDL	88.1	88.9	72.7	51.8	51.0	35.6	36.2
5 MCS	4.8	5.8	8.6	15.0	15.4	18.3	19.1
6 MDS	-28.3	-28.1	-28.2	-29.4	-29.4	-29.1	-25.0
7 MBRL	-23.6	-22.3	-19.6	-14.4	-13.9	-10.8	-6.0
8 USU	11.4	13.7	14.2	30.6	33.6	27.4	39.8
9 USL	-13.8	-10.0	-25.5	-33.1	-31.7	-31.8	-24.3
10 USLE	-1.7	6.2	-11.5	-1.3	8.2	-12.0	16.9
11 USR	-3.1	-0.7	-1.9	-0.1	-3.8	2.7	-2.4
12 URT	-1.78	1.41	-6.12	-1.51	1.41	-3.53	6.59
13 USC	1.037	1.031	1.107	1.215	1.212	1.184	1.221
14 URL	-2.4	3.7	-11.3	-2.5	1.8	-4.4	15.4
15 UCL	-4.8	5.5	-13.4	-1.4	4.4	-9.4	14.5
16 UCA	31.8	44.5	26.5	43.9	48.9	37.8	52.3
17 UDA	45.9	32.9	59.1	46.9	41.7	49.5	39.4
18 URS	12.6	11.9	19.9	31.9	32.7	29.6	32.1
19 AZI	267	285	250	253	266	243	282

表 3-1-6 アンドリュース実験林での地形カテナと単位区から導かれた
19の微地形特性値の相関行列

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1 MCH	1																		
2 MDH	-.1	1																	
3 MCL	.92	-.92	1																
4 MDL	-.95	.95	-.93	1															
5 MCS	.96	-.96	.87	-.94	1														
6 MDS	.04	-.04	-.07	.23	-.01	1													
7 MDRU	.89	-.89	.75	-.75	.90	.43	1												
8 AZI	-.23	.23	-.31	.23	-.17	.06	-.12	1											
9 USU	.73	-.73	.72	-.76	.81	-.12	.68	-.19	1										
10 USL	-.68	.68	-.75	.75	-.74	.25	-.56	.31	-.77	1									
11 USLE	.01	-.01	-.02	-.04	.07	.05	.08	.44	.27	-.04	1								
12 USR	.06	-.06	.02	-.07	.07	-.15	-.01	-.52	.04	-.04	-.58	1							
13 URI	.10	-.10	-.01	-.09	.17	.12	.21	.12	.46	.09	.54	.13	1						
14 USC	.73	-.73	.74	-.77	.80	-.16	.65	-.29	.93	-.90	.14	.07	.20	1					
15 URL	.15	-.15	.03	-.11	.19	.18	.25	.15	.44	.23	.36	.01	.84	.16	1				
16 UCL	.07	-.07	.00	-.12	.14	-.08	.09	.02	.36	-.08	.62	.28	.77	.23	.43	1			
17 UCA	.32	-.32	.22	-.38	.43	-.18	.31	.10	.61	-.32	.44	.18	.66	.51	.49	.69	1		
18 UDA	.05	-.05	.16	-.02	-.01	.08	.03	-.25	-.09	-.20	-.42	-.08	-.60	.06	-.43	-.58	-.69	1	
19 URS	.75	-.75	.78	-.80	.82	-.19	.66	-.26	.95	-.94	.17	.04	.21	.97	.13	.24	.50	.05	1

高原山と同様に微地形の広がりはずしも等高線に沿っていなかった。地形図から読み取れない起伏など微地形特性値が評価され、地形カテナにおける微地形の単位や広がりが明瞭であった。

第2項 同一尾根の4地形カテナ

長野営林局三浦実験林において高原山で用いた微地形特性値に標高、相対高、相対長を加えた22の微地形特性値を用い、同一尾根から東西南北の4つの地形カテナについて55地点の微地形の記載を行った。

表 3-1-7 三浦実験林における22の微地形特性値を用いた主成分分析の結果(微地形特性値の記号は表2-1-1による)

微地形特性値	21		22		23	
	固有ベクトル	因子負荷量	固有ベクトル	因子負荷量	固有ベクトル	因子負荷量
1 ALT	.32	.93(.95)	.10	.23(-.14)	.11	.20(-.27)
2 MCH	-.32	-.93(-.95)	-.10	-.23(-.14)	-.12	-.21(-.27)
3 MDH	.29	.85(.88)	.00	.01(-.13)	.25	.43(.06)
4 MDL	-.32	-.92(-.98)	-.05	-.11(-.13)	-.20	-.35(-.08)
5 MCL	.30	.86(.89)	-.05	-.13(-.08)	-.23	-.39(-.06)
6 MDL	.32	.92(.97)	.07	.16(-.13)	.16	.29(-.15)
7 MRL	-.31	-.91(-.99)	-.06	-.13(-.10)	-.21	-.37(-.07)
8 MCS	.26	.74(-.53)	-.15	-.34(-.37)	.23	.40(-.76)
9 MDS	-.05	-.13(-.18)	.25	.78(.46)	-.19	-.33(-.86)
10 MDRU	-.19	-.54(-.47)	.36	.58(.79)	-.01	-.01(-.37)
11 AZI	.05	.15(-.14)	.13	.28(-.04)	-.14	-.24(-.98)
12 USU	-.15	-.43(-.12)	-.18	-.41(-.33)	.39	.68(-.93)
13 USL	-.03	-.07(-.03)	.39	.90(.57)	-.11	-.20(-.82)
14 USLE	-.09	-.27(-.07)	.03	.07(.83)	.25	.44(-.54)
15 USR	.00	.00(-.14)	.18	.41(-.66)	-.01	-.02(-.72)
16 URI	-.19	-.55(-.15)	.28	.64(.98)	.25	.44(-.03)
17 USC	-.17	-.49(-.39)	-.28	-.64(-.01)	.20	.34(-.91)
18 URL	-.16	-.45(-.12)	.25	.57(.99)	.23	.39(-.03)
19 UCL	-.11	-.32(-.04)	.26	.59(.99)	.29	.50(-.03)
20 UCA	-.22	-.64(-.28)	.22	.49(.93)	.25	.43(-.09)
21 UDA	.18	.52(-.24)	-.27	-.61(-.96)	-.17	-.30(-.14)
22 URS	-.10	-.29(-.11)	-.33	-.74(-.06)	.28	.49(-.99)
固有値	8.49		5.12		3.03	
寄与率	38.6		23.3		13.7	
累積寄与率	38.6		61.9		75.6	

※()内は規準バリマックス回転後の因子負荷量

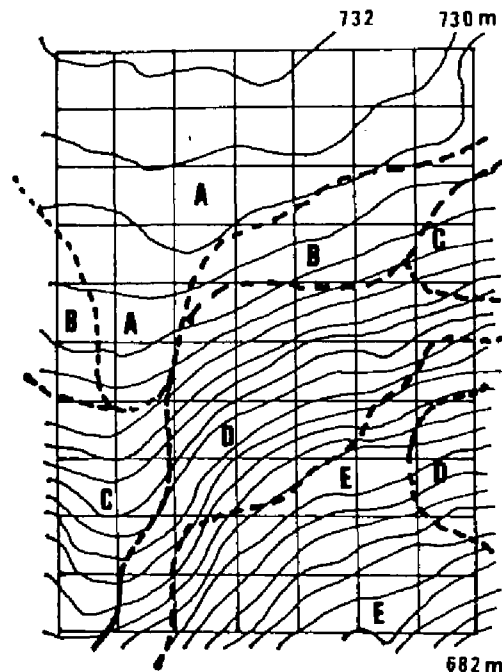


図 3-1-4 アンドリュース実験林における微地形単位の区分図

(A: 残積斜面、B: 浸潤斜面、C: 匍行斜面、D: 運積斜面、E: 崩積斜面、点線は微地形の区分界、実線は等高線、直線は調査方形区)

主成分分析の結果、第3主成分の固有値は3.03と総合特性値を表し、累積寄与率は75.6%であった(表3-1-7)。第1主成分は地形カテナから導かれた微地形特性値を表し、第2主成分は単位区から導かれた微地形特性値が表現されている。規準バリマックス回転後の因子負荷量からもこの傾向は明瞭であった。寄与率は13.7%と小さい第3主成分は単位区から導かれた特性値—方位、上下方傾斜、表面曲率などを表現した。

全体の特性値の61.9%を表現している第1主成分と第2主成分のスコア散布図から9つの微地形単位を区分した(図3-1-5)。地形カタナの上部から残積斜面、浸潤斜面、匍行斜面(1)、運積斜面(1)、崩積斜面(1)、運積斜面(2)、崩積斜面(2)、匍行斜面(2)、沖積斜面と出現序列が示された。(1)と(2)は同じ微地形の繰り返しであるが、微地形特性値の幾つかが相違することで細区分された。匍行斜面(1)と(2)では地形カタナに占める位置が相違し、運積斜面(1)と(2)では微凸型、微凹型の違い、崩積斜面(1)と(2)では排水面積と集水面積との割合、平面と凹面の違いがあった。

微地形特性値を微地形別に平均すると、残積斜面は凸型面で緩傾斜、表面曲率が最小で、排水面積が最も広がった(表3-1-8)。浸潤斜面は平坦で集水面積と排水面積との割合が等しく、相対傾斜も12.2と緩やかであった。匍行斜面(1)と(2)は最も凸型で、排水面積の割合が最も広がった。匍行斜面(1)は匍行斜面(2)より上部に位置し、(2)は相対傾斜が31.0と急傾斜を示した。運積斜面(1)と(2)は地形カタナ中腹部に位置して、運積斜面(1)は微凸型で急傾斜、運積斜面(2)は微凹型で、集水面積が排水面積に対して広がった。崩積斜面(1)と(2)は運積斜面の下部に位置し、崩積斜面(1)は凹型で集水面積が広く、崩積斜面(2)は平坦で集水面積と排水面積がほぼ等しかった。沖積斜面は地形カタナの最下部に位置し、最も強い凹型面を示し、集水面積が最も広く、緩傾斜である。

ここでは4つの地形カタナを併せて区分したが、各地形カタナにおいての微地形の出現序列は相違した。

- 北向き方向：残積斜面－匍行斜面(1)－運積斜面(1)(2)－崩積斜面(1)(2)
 －匍行斜面(2)－沖積斜面
- 東向き斜面：残積斜面－匍行斜面(1)－浸潤斜面－崩積斜面(1)
 －運積斜面(1)－崩積斜面(2)－運積斜面(2)
- 西向き斜面：残積斜面－浸潤斜面－匍行斜面(1)－運積斜面(1)
 －崩積斜面(1)－運積斜面(2)－崩積斜面(2)－沖積斜面
- 南向き斜面：残積斜面－匍行斜面(1)－崩積斜面(1)－運積斜面(1)(2)
 －崩積斜面(2)－匍行斜面(2)－沖積斜面

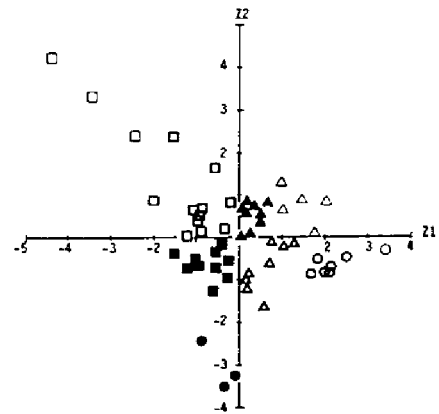


図3-1-5 三浦実験林における22の微地形特性値を使った主成分分析による第1主成分と第2主成分のスコア散布図
 (○：残積斜面、△：浸潤斜面、○：匍行斜面(1)、●：匍行斜面(2)、△：運積斜面(1)、▲：運積斜面(2)、□：崩積斜面(1)、■：崩積斜面(2)、□：沖積斜面)

表3-1-8 三浦実験林における微地形単位別の微地形特性値

微地形 特性値	残積 斜面	浸潤 斜面	匍行 斜面(1)	匍行 斜面(2)	運積 斜面(1)	運積 斜面(2)	崩積 斜面(1)	崩積 斜面(2)	匍行 斜面(2)	沖積 斜面
1 ALT	1458	1454	1454	1440	1444	1430	1420	1411	1412	
2 MCH	0	4	5	18	14	28	34	46	46	
3 NDR	53	35	43	31	25	14	13	6	0	
4 NRH	0	10	10	37	38	69	73	89	100	
5 MCL	0	20	23	59	63	90	95	133	138	
6 MDL	155	118	117	73	78	41	33	10	0	
7 MRL	0	15	16	43	45	69	75	93	100	
8 MCS	0	10	11	17	13	18	20	19	18	
9 MDS	0	-16	-20	-23	-17	-16	-21	-32	0	
10 MRRL	0	-6	-9	-6	-4	-2	-4	-12	18	
11 AZI	335	200	110	110	200	159	146	80	170	
12 USU	-4.0	13.6	12.5	22.5	17.9	19.7	21.1	26.7	19.3	
13 USL	-9.0	-10.6	-17.8	-24.3	-15.0	-14.4	-20.6	-34.3	-7.0	
14 USLE	-5.0	-4.8	-3.3	-3.3	2.1	7.8	8.0	-7.3	7.7	
15 USR	-7.0	5.6	-5.2	1.8	1.9	3.2	-10.6	-14.0	4.7	
16 URI	-6.40	0.81	-3.03	-1.92	1.20	3.21	0.28	-4.49	8.30	
17 USC	1.018	1.035	1.044	1.142	1.057	1.086	1.143	1.231	1.099	
18 URL	-13.0	3.0	-5.3	-1.8	2.9	5.4	0.5	-7.7	26.3	
19 UCL	-12.0	0.8	-8.5	-1.5	4.0	11.0	-2.6	-21.3	12.3	
20 UCA	0	39.0	28.0	40.7	43.1	46.3	41.2	25.6	78.5	
21 UDA	101.8	36.0	48.0	43.2	36.0	31.5	42.3	61.0	4.3	
22 URS	7.0	12.2	15.5	23.6	16.8	17.2	21.1	31.0	13.7	
NO. of Plots	1	5	6	8	8	11	10	3	3	

となり、地形カテナによってはいくつかの微地形は分布しなかった。全体でみると浸潤斜面と匍行斜面(1)は同じ標高に分布していた。浸潤斜面を欠く地形カテナや匍行斜面(1)が浸潤斜面の上部に位置する地形カテナがあることから4つの地形カテナの浸潤斜面と匍行斜面の標高は同じ平均値を示した。東向き斜面では沖積斜面が分布していない。このことは調査区域が沖積斜面に達していないためであった。同じ母材で同じ尾根からの地形カテナにおいても方位が相違すると、微地形の出現序列は相違することが認められた。

表3-1-9 三浦実験林での地形カテナと単位区から導かれた22の微地形特性値の相関行列

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
1. ALT	1.00																					
2. PCN	-.99	1.00																				
3. PCN	.83	-.84	1.00																			
4. PCN	-.94	.94	-.94	1.00																		
5. PCN	-.90	.91	-.88	.84	1.00																	
6. PCN	-.92	-.92	.93	-.87	-.92	1.00																
7. PCN	-.94	.94	-.93	.89	.86	-.97	1.00															
8. PCN	-.70	.70	-.46	.59	.44	-.63	.55	1.00														
9. PCN	.00	.00	-.24	.16	.06	-.07	.12	-.29	1.00													
10. PCN	-.37	.37	-.40	.41	.33	-.38	.40	.20	.74	1.00												
11. AZI	.24	-.24	-.11	-.07	-.14	.02	-.07	-.35	.33	.17	1.00											
12. UBU	-.32	.31	-.11	.20	.19	-.27	.19	.63	-.42	.01	-.32	1.00										
13. UBU	.06	-.06	-.09	.02	.03	.02	.01	-.31	.72	.53	.21	-.45	1.00									
14. UBU	-.10	.10	-.06	.14	-.08	-.17	.09	.44	.07	.31	.36	.26	-.04	1.00								
15. UBU	.04	-.04	.03	-.08	.09	.11	-.04	-.22	.15	.03	-.36	.15	.33	-.66	1.00							
16. UBU	-.28	.28	-.27	.27	.22	-.27	.25	.34	.35	.58	.01	.28	.55	.35	.29	1.00						
17. UBU	-.57	.57	-.22	.38	.38	-.41	.37	.69	-.56	-.01	-.31	.66	-.64	.13	-.17	.03	1.00					
18. UBU	-.21	.20	-.19	.20	.20	-.21	.18	.23	.37	.55	-.06	.40	.62	.17	.20	.81	.02	1.00				
19. UBU	-.07	.07	-.06	.06	.01	-.06	.05	.27	.28	.12	-.00	.13	.34	.11	.41	.78	-.04	.17	1.00			
20. UBU	-.39	.38	-.33	.36	.34	-.38	.35	.45	.27	.59	-.10	.32	.36	.31	.25	.80	.15	.65	.88	1.00		
21. UBU	.24	-.24	.35	-.30	-.37	.31	-.29	-.30	-.35	-.50	.01	-.14	-.48	-.24	-.29	-.75	.14	-.60	-.66	-.87	1.00	
22. UBU	-.30	.30	-.06	.18	.16	-.24	.18	.58	-.58	-.18	-.29	.86	-.80	-.20	-.32	-.13	.74	-.06	-.13	.04	.15	1.00

微地形特性値間の関係では地形カテナからの特性値は排水傾斜、縦断線型性を除いて相互に高い相関を示した(表3-1-9)。単位区から導かれる特性値は上下方傾斜に対して表面曲率・相対傾斜が、起伏指数に対して縦断線型性・コンター線型性がそれぞれ相関を示した。一方、地形カテナから導かれた特性値と単位区から導かれた特性値との間には先に分析したような排水傾斜と下方傾斜(相関係数は0.72)を除いて±0.7以上の高い相関を示さなかった。微地形区分を行なう対象地域が複数の地形カテナを含む場合、地形カテナから導かれる特性値と単位区から導かれる特性値の間は相関性が低くなる傾向を示している。このことは地形カテナ毎に微地形の出現序列が相違すること、同じ形態を持った微地形が繰り返し分布することによると考えられた。

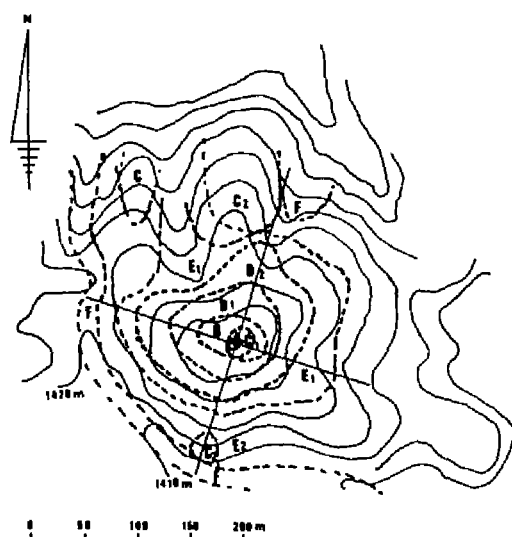


図3-1-6 三浦実験林における調査線と微地形単位の区分図

(A:残積斜面、B:浸潤斜面、C:匍行斜面、D:運積斜面、E:崩積斜面、F:沖積斜面、点線は微地形の区分界、実線は等高線、直線は調査線)

4方向で区分した微地形から微地形単位の分布を推定した(図3-1-6)。匍行斜面は地形カテナの下部にも分布していることが明かであった。微地形の出現序列の違いも明かであるが、実測をしていない場所の微地形は推定を行なう以外に微地形を決定できる方法はなく、微地形区分図を作成するためには面的な調査が必要と考えられた。

4方向で区分した微地形から微地形単位の分布を推定した(図3-1-6)。匍行斜面は地形カテナの下部にも分布していることが明かであった。微地形の出現序列の違いも明かであるが、実測をしていない場所の微地形は推定を行なう以外に微地形を決定できる方法はなく、微地形区分図を作成するためには面的な調査が必要と考えられた。

第3項 尾根の相違した複数の地形カテナ

梓川上流域の上高地において12の地形カテナ

ナから31調査地点を選び、高原山の19の微地形特性値に標高を加え、20として微地形の記載を行った。1地形カテナ上では1-3地点を調査した。

表3-1-10 上高地における20の微地形特性値を用いた主成分分析の結果（微地形特性値の記号は表2-1-1による）

微地形特性値	Z1		Z2		Z3	
	固有ベクトル	因子負荷量	固有ベクトル	因子負荷量	固有ベクトル	因子負荷量
1 ALT	.24	.73(.54)	.08	.16(-.21)	.16	.27(-.80)
2 MCH	-.24	-.74(-.34)	-.08	-.15(-.07)	-.31	-.51(-.93)
3 MCH	.25	.76(.57)	.13	.27(-.09)	.20	.32(-.81)
4 MCL	-.23	-.69(-.49)	-.10	-.20(-.08)	-.22	-.35(-.86)
5 MDL	.24	.71(.82)	.22	.44(-.01)	.05	.07(-.56)
6 MCS	-.14	-.41(-.28)	.16	.33(-.28)	-.39	-.64(-.91)
7 MDS	-.25	-.74(-.31)	.02	.04(-.35)	-.23	-.37(-.87)
8 MRR	-.22	-.66(-.04)	.12	.25(-.30)	-.38	-.62(-.94)
9 AZI	-.14	-.43(-.80)	-.21	-.42(-.11)	-.06	-.09(-.57)
10 USU	.20	.61(-.99)	.34	.69(-.07)	-.20	-.32(-.07)
11 USL	-.28	-.83(-.92)	-.18	-.35(-.31)	.21	.33(-.19)
12 USR	-.21	-.62(-.15)	.28	.57(-.97)	.18	.30(-.15)
13 USLE	-.22	-.66(-.35)	.22	.43(-.93)	.31	.51(-.00)
14 URI	-.23	-.68(-.11)	.32	.64(-.97)	.17	.28(-.16)
15 USC	.24	.71(-.97)	.23	.45(-.20)	-.26	-.42(-.07)
16 URL	-.14	-.43(-.26)	.37	.75(-.91)	.00	.00(-.29)
17 UCL	-.23	-.69(-.25)	.27	.54(-.96)	.26	.43(-.06)
18 UCA	-.15	-.45(-.30)	.33	.67(-.86)	-.07	-.12(-.40)
19 UDA	.29	.88(-.57)	-.06	-.12(-.69)	-.08	-.14(-.43)
20 URS	.25	.74(-.98)	.27	.54(-.10)	-.21	-.34(-.13)
固有値	9.03		4.03		2.65	
寄与率	45.2		20.1		13.3	
累積寄与率	45.2		65.3		78.6	

*: ()内は規準バリマックス回転後の因子負荷量

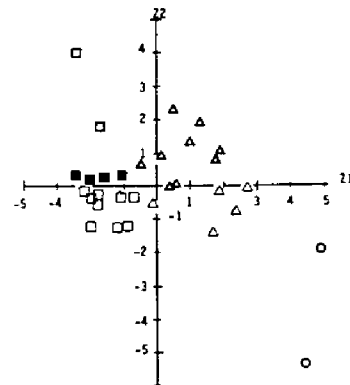


図3-1-7 上高地における20の微地形特性値を使った主成分分析による第1主成分と第2主成分のスコア散布図。

(△: 浸潤斜面、○: 匍行斜面、△: 運積斜面、□: 崩積斜面(1)、■: 崩積斜面(2)、□: 沖積斜面)

主成分分析の結果は第3主成分の固有値が2.65と総合特性値を示し、累積寄与率が78.6%となった(表3-1-10)。第1主成分には地形図と単位区から導かれた特性値の多くが表現され、第2主成分には単位区から導かれた特性値が表現されていた。しかし、規準バリマックス回転後の因子負荷量から検討すると、寄与率が13.3%と小さい第3主成分は地形カテナから導かれた多くの特性値を表現していた。

全体の特性値の65.3%を表現している第1主成分と第2主成分のスコア散布図から浸潤斜面、匍行斜面、運積斜面、崩積斜面(1)、崩積斜面(2)、沖積斜面の6つを区分した(図3-1-7)。

ここでの微地形の特徴は、浸潤斜面が凸型で排水面積が広がった(表3-1-11)。匍行斜面は最も凸型で最大相対傾斜を示した。運積斜面はほぼ平坦面を呈し、集水面積と排水面積とは同じ割合を示した。最も凹型で急傾斜を示した崩積斜面(1)は崩積斜面(2)と共に排水面積に比較して集水面積が広がった。崩積斜面(2)は緩傾斜で、微凹型面を示すことで崩積斜面(1)と区分される。沖積斜面は平坦面で最も緩やかな相対傾斜を示した。

この調査地の地形図から導かれた微地形特性値は排水傾斜角が集水長、集水高に相関を持つのが特徴的である。単位区から導かれた特性値では高原山、三浦実験林とほぼ同じ相関性を示した。しかし地形図と単位区からの微地形特性値間の相関は1地形カテナや4地形カテナの場合よりも低くなっていた(表3-1-12)。

屋久島では白谷保存林、屋久杉ランド、下屋久営林署第9林班の異なる3流域において、地形

表3-1-11 上高地における微地形単位別の微地形特性値

特性値	微地形単位					
	浸潤斜面	匍行斜面	運積斜面	崩積斜面(1)	崩積斜面(2)	沖積斜面
1 ALT	2403	2140	2077	1665	1614	1593
2 MCH	410	285	336	785	921	1149
3 MCH	632	535	489	195	37	24
4 MCL	771	371	718	1130	1412	2187
5 MDL	2224	1475	1823	1250	379	194
6 MCS	21.6	19.0	22.5	35.1	33.8	27.8
7 MDS	-16.8	-23.5	-17.4	-9.1	-4.0	-5.2
8 MRR	4.8	-4.5	5.3	26.0	29.8	22.7
9 AZI	144	180	131	116	320	250
10 USU	17.2	22.5	27.2	24.6	8.5	4.9
11 USL	-21.6	-36.0	-22.9	-19.1	-6.5	-5.4
12 USR	-4.6	-19.5	-0.0	16.0	2.3	0.6
13 USLE	-4.4	-20.5	1.4	6.1	3.5	0.5
14 URI	-3.27	-15.57	0.64	7.98	1.49	0.01
15 USC	1.100	1.234	1.153	1.104	1.015	1.008
16 URL	-4.4	-15.5	2.9	12.0	2.0	-0.5
17 UCL	-9.0	-40.0	1.3	22.1	5.8	0.9
18 UCA	24.5	17.7	43.2	50.9	50.7	39.1
19 UDA	55.2	77.0	38.8	32.8	16.0	18.4
20 URS	19.8	29.5	24.4	25.5	7.8	5.3
No. of Plots	5	2	9	2	4	9

表 3-1-12 上高地での地形図と単位区から導かれた 20 の微地形特性値の相関行列

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1. ALT	1.00																			
2. MCH	-.60	1.00																		
3. MCH	-.82	-.70	1.00																	
4. MCL	-.59	-.87	-.85	1.00																
5. MCL	-.59	-.83	-.90	-.59	1.00															
6. MCS	-.22	-.58	-.31	-.28	-.24	1.00														
7. MCS	-.72	-.61	-.68	-.58	-.33	-.38	1.00													
8. MRL	-.52	-.71	-.56	-.49	-.34	-.87	-.78	1.00												
9. AZI	-.48	-.33	-.38	-.17	-.37	-.16	-.40	-.31	1.00											
10. USU	-.40	-.38	-.49	-.42	-.66	-.14	-.33	-.07	-.18	1.00										
11. USL	-.81	-.50	-.55	-.52	-.68	-.06	-.17	-.28	-.40	-.68	1.00									
12. USLE	-.27	-.25	-.29	-.21	-.19	-.23	-.38	-.36	-.04	-.06	-.36	1.00								
13. USR	-.35	-.12	-.25	-.14	-.25	-.08	-.31	-.22	-.21	-.23	-.32	-.74	1.00							
14. URI	-.33	-.27	-.27	-.25	-.16	-.29	-.44	-.42	-.01	-.05	-.42	-.88	-.88	1.00						
15. USC	-.36	-.41	-.45	-.41	-.69	-.01	-.26	-.14	-.41	-.90	-.93	-.29	-.45	-.30	1.00					
16. URL	-.18	-.24	-.06	-.18	-.02	-.44	-.27	-.44	-.18	-.28	-.18	-.57	-.58	-.77	-.01	1.00				
17. UCL	-.33	-.20	-.29	-.19	-.23	-.17	-.27	-.31	-.08	-.16	-.47	-.94	-.92	-.95	-.40	-.82	1.00			
18. UCA	-.20	-.26	-.18	-.22	-.09	-.45	-.37	-.50	-.12	-.19	-.09	-.85	-.50	-.61	-.02	-.61	-.56	1.00		
19. UDA	-.52	-.64	-.48	-.59	-.31	-.28	-.64	-.52	-.29	-.52	-.76	-.58	-.66	-.67	-.61	-.47	-.66	-.58	1.00	
20. URS	-.47	-.45	-.54	-.49	-.69	-.03	-.41	-.19	-.45	-.97	-.97	-.23	-.39	-.24	-.94	-.04	-.32	-.04	-.66	1.00

カタナに沿って上高地と同じ 20 の微地形特性値を用いて微地形を記載した。

表 3-1-13 屋久島(白谷保存林、屋久杉ランド、下屋久営林署第 9 林班)における 20 の微地形特性値を用いた主成分分析の結果(微地形特性値の記号は表 2-1-1 による)

微地形特性値	主成分 21		主成分 22		主成分 23	
	固有ベクトル	因子負荷量	固有ベクトル	因子負荷量	固有ベクトル	因子負荷量
1 ALT	-.16	.47(.10)*	-.14	.29(.04)	.50	.78(.99)
2 MCH	-.19	-.55(.14)	-.16	-.31(.06)	-.47	-.72(.98)
3 MCH	-.25	-.74(.94)	-.12	-.24(.12)	-.03	-.04(.28)
4 MCL	-.80	-.58(.21)	-.12	-.23(.01)	-.45	-.70(.97)
5 MCL	-.92	-.64(.80)	-.03	-.06(.03)	-.10	-.15(.59)
6 MCS	-.24	-.70(.61)	-.21	-.43(.49)	-.12	-.18(.70)
7 MCS	-.15	-.44(.90)	.23	.46(.41)	.11	.17(.08)
8 MRL	-.27	-.78(.84)	-.02	-.04(.17)	-.02	-.03(.50)
9 AZI	-.14	-.41(.94)	-.09	-.17(.18)	-.01	-.01(.26)
10 USU	-.15	-.44(.22)	-.41	-.81(.94)	.16	.24(.23)
11 USL	-.02	-.06(.22)	.44	.88(.97)	-.19	-.30(.03)
12 USLE	-.28	-.82(.99)	.11	.22(.05)	.22	.34(.00)
13 USR	-.29	-.84(.99)	.11	.22(.01)	.13	.21(.14)
14 URI	-.32	-.92(.98)	.10	.20(.04)	.14	.21(.15)
15 USC	-.02	-.05(.09)	-.42	-.85(.99)	.22	.35(.01)
16 URL	-.22	-.64(.71)	-.11	-.22(.43)	-.02	-.03(.55)
17 UCL	-.30	-.87(.99)	.12	.23(.03)	.18	.29(.06)
18 UCA	-.31	-.90(.94)	.00	.01(.23)	.15	.23(.21)
19 UDA	.31	.90(.95)	-.11	-.22(.05)	-.04	-.08(.30)
20 URS	-.07	-.19(.00)	-.46	-.82(.99)	.19	.30(.09)
固有値	8.56		4.01		2.41	
寄与率	42.8		20.0		12.1	
累積寄与率	42.8		62.8		74.9	

*: ()内は標準バリマックス回転後の因子負荷量

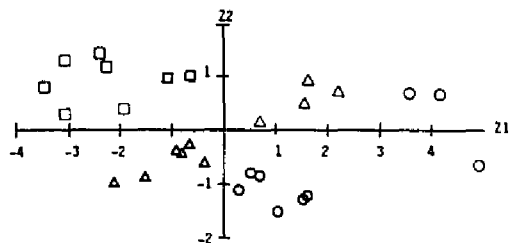


図 3-1-8 屋久島(白谷保存林、屋久杉ランド、下屋久営林署第 9 林班)における 20 の微地形特性値を使った主成分分析による第 1 主成分と第 2 主成分のスコア散布図

(○: 残積斜面、△: 浸潤斜面、□: 匍行斜面、◇: 運積斜面、◇: 崩積斜面、◇: 沖積斜面)

1 主成分と第 2 主成分のスコア散布図から、ここでは残積斜面、浸潤斜面、崩積斜面、匍行斜

主成分分析の結果は第 3 主成分の固有値が 2.41、累積寄与率が 74.9%と総合特性値を表している(表 3-1-13)。第 1 主成分には地形カタナと単位区から導かれた特性値の多くが表わされ、第 2 主成分には単位区から導かれた特性値が表現されていた。第 3 主成分には地形カタナから導かれた特性値が表現されていた。標準バリマックス回転後の因子負荷量から検討すると、多くの微地形特性値は第 1 主成分に総合化されていた。

表 3-1-14 屋久島(白谷保存林、屋久杉ランド、下屋久営林署第 9 林班)における微地形単位別の微地形特性値

微地形特性値	残積		浸潤		匍行		運積		崩積		沖積	
	頻度	割合	頻度	割合	頻度	割合	頻度	割合	頻度	割合	頻度	割合
1 ALT	1187	1151	966	961	1133	942						
2 MCH	0	25	162	168	70	194						
3 MCH	156	109	142	44	43	30						
4 MCL	1	92	331	373	187	445						
5 MCL	387	309	320	179	158	123						
6 MCS	0	13	25	25	19	24						
7 MCS	-22	-20	-24	-15	-15	-12						
8 MRL	-22	-8	1	10	5	12						
9 AZI	215	190	228	170	195	155						
10 USU	2.3	9.3	30.0	33.2	13.0	17.7						
11 USL	-16.3	-14.3	-28.3	-28.2	-7.5	-11.0						
12 USLE	-20.3	-5.5	-10.2	0.7	2.5	17.7						
13 USR	-28.0	-9.5	-14.3	-0.2	3.5	14.3						
14 URI	-17.27	-5.57	-6.69	0.93	3.55	9.41						
15 USC	1.136	1.050	1.190	1.175	1.031	1.103						
16 URL	-14.0	-5.0	1.7	5.0	5.5	5.0						
17 UCL	-48.3	-15.0	-24.5	0.5	6.0	32.0						
18 UCA	0	19.5	27.3	45.2	38.8	67.8						
19 UDA	94.5	65.7	61.0	40.6	12.8	10.8						
20 URS	11.7	12.3	29.2	30.7	10.3	14.3						
No. of Plots	3	3	6	6	2	6						

全体の特性値の 62.8%を表現している第

面、運積斜面、沖積斜面の6つを区分した(図3-1-8、表3-1-14)。

残積斜面は緩傾斜で凸型面を呈し、排水面積が圧倒的に広がった。続く浸潤斜面は残積斜面と形態は似ているが凸型や排水面積の割合の程度が弱かった。匍行斜面は凸型で排水面積の割合も高く急傾斜となっていた。運積斜面はほぼ平坦な急傾斜地となり、排水面積に対する集水面積の割合が高くなった。崩積斜面では凹型面となり、集水面積が排水面積より広く緩傾斜であった。地形カテナの最下部に沖積斜面があり、最も凹型面を呈し集水面積の割合が大きかった。

表3-1-15 屋久島(白谷保存林、屋久杉ランド、下屋久宮林署第9林班)の地形図と単位区から導かれた微地形特性値の相関行列

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1. ALT	1.00																			
2. MCH	-.90	1.00																		
3. MCH	.20	-.24	1.00																	
4. MCL	-.86	.97	-.32	1.00																
5. MCL	.32	-.39	.87	-.43	1.00															
6. MCS	-.56	.57	-.38	.50	-.44	1.00														
7. MDS	.06	-.06	-.55	.04	-.26	.09	1.00													
8. MRR	-.37	.38	-.61	.40	-.49	.79	.67	1.00												
9. AZI	.23	-.15	.47	-.17	.36	-.05	-.10	-.10	1.00											
10. USU	-.25	.28	-.12	.24	-.13	.61	-.09	.39	-.01	1.00										
11. USL	-.00	-.04	-.12	-.02	-.04	-.21	.31	.03	-.07	-.70	1.00									
12. USLE	-.06	.19	-.61	.25	-.36	.36	.40	.51	-.32	.19	.11	1.00								
13. USR	-.21	.28	-.55	.31	-.40	.45	.31	.52	-.43	.20	.18	.82	1.00							
14. URT	-.22	.30	-.62	.33	-.44	.53	.44	.66	-.36	.31	.21	.89	.92	1.00						
15. USC	.00	.09	.13	.03	.00	.28	-.30	.01	.08	.71	-.87	.02	-.07	-.08	1.00					
16. URL	-.37	.35	-.30	.32	-.25	.59	.18	.55	-.06	.64	.06	.33	.40	-.59	.04	1.00				
17. UCL	-.14	.25	-.61	.29	-.45	.42	.37	.54	-.40	.21	.15	.95	.95	.95	-.02	.38	1.00			
18. UCA	-.28	.37	-.57	.41	-.42	.49	.35	.57	-.40	.43	.01	.87	.85	.90	.16	.53	.90	1.00		
19. UDA	.27	-.42	.64	-.47	.50	-.46	-.53	-.66	.32	-.27	-.25	-.79	-.78	-.90	.11	-.60	-.82	-.85	1.00	
20. URS	-.12	.16	-.00	.12	-.06	.14	-.24	.17	.03	.91	-.91	.03	.01	.04	.86	.31	.02	.22	.02	1.00

微地形特性値間の相関は減少してくるが、全体の傾向は先の4例とほぼ同じであった(表3-1-15)。

標高で微地形の出現序列をみると、浸潤斜面—崩積斜面—匍行斜面の順序となっている。さきに微地形の出現序列が斜面の形成過程を表すことを検討したが、複数の地形カテナを含む微地形区分の場合、調査地点の選定により微地形の出現序列は変化すると考えられる。このため個々の地形カテナについて微地形の出現序列を解析する必要がある。

表3-1-16 赤石山脈における20の微地形特性値を用いた主成分分析の結果(微地形特性値の記号は表2-1-1による)

微地形 特性値	主成分 Z1		主成分 Z2		主成分 Z3	
	固有値 ベクトル	因子 負荷量	固有値 ベクトル	因子 負荷量	固有値 ベクトル	因子 負荷量
1 ALT	.12	.30(.97)*	.19	.37(.15)	.17	.30(-.15)
2 MCH	-.20	-.51(-.97)	-.22	-.43(-.01)	-.27	-.48(.08)
3 MCH	.24	.61(.97)	.22	.42(-.04)	.24	.43(-.20)
4 MCL	-.16	-.41(-.99)	-.20	-.39(-.04)	-.26	-.45(-.04)
5 MCL	.22	.56(.96)	.25	.48(.04)	.20	.36(-.25)
6 MCS	-.27	-.67(-.89)	-.20	-.38(-.10)	-.13	-.22(-.43)
7 MDS	-.10	-.26(-.79)	.03	.05(-.44)	-.32	-.57(-.41)
8 MRR	-.23	-.59(-.96)	-.11	-.21(-.26)	-.28	-.50(-.04)
9 AZI	.01	.02(-.41)	-.11	-.21(-.88)	.01	.01(-.22)
10 USU	-.30	-.76(-.14)	-.10	-.20(-.14)	.33	.59(.97)
11 USL	.28	.71(.14)	.14	.27(-.05)	.33	-.59(-.98)
12 USLE	-.22	-.56(-.11)	.32	.63(.98)	.06	-.14(-.09)
13 USR	-.18	-.46(-.00)	.34	.68(.99)	-.06	-.11(-.04)
14 URT	-.27	-.67(-.05)	.35	.70(.97)	-.03	-.04(-.20)
15 USC	-.24	-.62(-.12)*	-.19	-.38(-.08)	.36	.64(.98)
16 URL	-.10	-.24(-.15)	.06	.12(-.75)	.04	.08(-.63)
17 UCL	-.23	-.58(-.06)	.38	.75(.99)	-.08	-.14(-.06)
18 UCA	-.32	-.81(-.14)	.17	.33(-.73)	.14	.25(-.66)
19 UDA	.19	.47(-.13)	-.32	-.63(-.98)	.13	.23(-.06)
20 URS	-.30	-.74(-.14)	-.13	-.25(-.09)	.34	.61(.98)
固有値	6.33		3.88		3.13	
寄与率	31.6		19.5		15.6	
累積寄与率	31.6		51.1		66.7	

*:()内は基準バリマックス回転後の因子負荷量

野呂川と大井川の上流域の茶臼岳、聖平、赤石岳、阿部荒倉岳、広河内岳、野呂川越、仙丈岳、栗沢山などの地形カテナ14以上を含む赤石山脈において、上高地と同じ20の微地形特性値を用いて82地点で微地形の記載を行った。

微地形を区分するための主成分分析の結果は第3主成分の固有値が3.13、累積寄与率が66.7%となり総合特性値を表現していた(表3-1-16)。規準バリマックス回転後の因子負荷量から検討すると、第1主成分は地形カテナから導かれた特性値を表わし、第2主成分と第3主成分は単位区から導かれた特性値を表わしていた。高原山、アンドリュース実験林、三浦実験林と同じ傾向であった。

ここではより区分が明瞭であるため第1主成分と第3主成分を用いてスコア散布図を示した(図3-1-9)。第1主成分には単位区からの特性値が負の値に、正の値には地形図からの特性値が表され、第3主成分には正の値に単位区からの特性値が、負の値には地形図からの特性値が表されている。微地形を残積斜面、匍行斜面、浸潤斜面、運積斜面(1)、崩積斜面、運積斜面(2)、沖積斜面の7つに区分した。

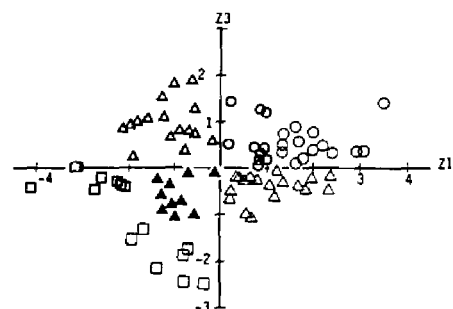


図3-1-9 赤石山脈における20の微地形特性値を使った主成分分析による第1主成分と第3主成分のスコア散布図。記号は微地形のまとまりを示し、形態から微地形が区分される。(○：残積斜面、△：浸潤斜面、○：匍行斜面、▲：運積斜面(1)、▼：運積斜面(2)、◻：崩積斜面、◻：沖積斜面)

微地形の特徴は、残積斜面では凸型で緩傾斜、排水面積が広がった(表3-1-17)。浸潤斜面は凸型でやや急な傾斜であった。運積斜面(1)は急傾斜で微凹型を示し、集水面積と排水面積がほぼ等しかった。運積斜面(2)は(1)より下部に位置し、微凸型で集水面積の割合が高かった。匍行斜面は凸型で排水面積の割合が高かった。崩積斜面は凹型で集水面積が広がった。続く沖積斜面は地形カタナの最下部に位置し、平坦であった。

微地形特性値の相互の関係では地形図(地形カタナ)と単位区から導かれる特性値の間に±0.5以上の相関を示さなかった(表3-1-18)。

この様に調査域を広げると個々の地形カタナのもつ微地形特性値が相殺されて特性値が互いに独立的になってくる。また得られた微地形の出現序列は個々の地形カタナと相違する。さらに、微地形の調査数が十分でない場合、微地形の区分は図示できず、調査地点での微地形の評価にとどまった。

アンドリュース実験林でみられた様に残積斜

表3-1-17 赤石山脈における微地形単位別の微地形特性値

微地形 特性値	残積 斜面	匍行 斜面	浸潤 斜面	運積 斜面(1)	崩積 斜面	運積 斜面(2)	沖積 斜面
1 ALT	2318	2192	2133	2257	1880	2122	1906
2 MCH	42	225	247	149	671	438	618
3 MCH	573	571	340	332	156	211	42
4 MCL	168	620	773	378	1548	961	1325
5 MDL	851	929	539	535	241	352	181
6 MCS	5.4	16.6	17.7	21.6	23.9	25.4	25.3
7 MDS	-34.3	-34.3	-31.7	-31.7	-29.9	-27.8	-12.3
8 MPRL	-28.9	-17.7	-14.1	-10.1	-6.0	-3.4	13.0
9 AZI	196	286	204	211	191	225	178
10 USU	8.0	18.9	6.6	36.4	36.0	18.8	8.6
11 USL	-6.3	-19.7	-9.3	-34.5	-31.9	-18.9	-8.4
12 USLE	-12.1	-5.8	-9.4	-1.1	8.9	-2.1	0.4
13 USR	-5.9	-8.1	-4.2	-0.5	5.7	1.6	1.0
14 URI	-5.02	-3.54	-4.55	0.51	4.71	-0.46	-0.01
15 USC	1.041	1.109	1.036	1.266	1.246	1.077	1.024
16 URL	1.1	-0.8	-2.7	1.9	4.1	-0.1	0.1
17 UCL	-18.0	-13.9	-13.6	-1.6	14.6	-0.5	1.4
18 UCA	11.0	29.7	13.5	48.4	53.2	41.3	29.3
19 UDA	54.9	48.7	57.7	44.4	37.5	35.4	34.6
20 URS	7.2	19.3	8.5	35.4	33.9	18.9	8.5
No of Plots	14	10	18	16	7	10	7

表3-1-18 赤石山脈での地形図と単位区から導かれた20の微地形特性値の相関行列

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1. ALT	1.00																			
2. MCH	-.52	1.00																		
3. MCH	.33	-.51	1.00																	
4. MCL	-.50	.94	-.43	1.00																
5. MDL	.39	-.55	.94	-.46	1.00															
6. MCS	-.32	.55	-.55	.40	-.52	1.00														
7. MDS	.00	.13	-.46	.02	-.24	.24	1.00													
8. MPRL	-.20	.44	-.63	.22	-.48	.78	.78	1.00												
9. AZI	.00	.03	-.04	-.03	-.01	.16	.01	.11	1.00											
10. USU	-.09	-.18	-.30	.11	-.31	.41	-.10	.19	.02	1.00										
11. USL	.11	-.17	.27	-.11	.27	-.45	.08	-.23	-.02	-.92	1.00									
12. USLE	-.03	.12	-.08	.08	-.02	.19	.17	.23	-.10	.18	-.16	1.00								
13. USR	.03	-.02	-.07	-.03	-.03	.05	.18	.14	-.17	.12	-.10	.51	1.00							
14. URI	-.01	.10	-.10	.05	-.05	.18	.16	.21	-.12	.33	-.24	.85	.78	1.00						
15. USC	-.18	.16	-.25	.09	-.28	.37	-.18	.13	.08	.91	-.92	.01	-.02	.11	1.00					
16. URL	.01	.07	-.12	.05	-.13	.01	-.04	-.02	.00	.34	.03	.06	.05	.28	.10	1.00				
17. UCL	-.00	.08	-.08	.03	-.03	.15	.19	.21	-.15	.17	-.18	.89	.84	.94	-.01	.08	1.00			
18. UCA	-.01	.16	-.23	.11	-.19	.35	.07	.27	-.08	.66	-.61	.57	.51	.70	.50	.29	.62	1.00		
19. UDA	-.02	-.11	.13	-.10	.04	-.05	-.28	-.20	.09	-.12	-.01	-.58	-.57	-.70	.11	-.38	-.66	-.64	1.00	
20. URS	-.11	.18	-.29	.11	-.30	.44	-.10	.21	.01	.97	-.98	.17	.11	.29	.93	.14	.16	.83	-.03	1.00

面が段丘と同じ地形であった場合、また上高地で崩積斜面が扇状地であった場合、段丘や扇状地などの高次の地形分類単位を冠して、段丘残積斜面、扇状地崩積斜面とすると微地形が理解し易くなると考えられる。

微地形の数値分類をするときに対象とする地域が複数の地形カテナを含んでいる場合、主成分における累積寄与率が低下する結果を得た。地形カテナ上で区分した微地形の組合せと出現序列が地形カテナ毎に相違するため複数の地形カテナを一緒に区分すると地形カテナから導かれる特性値と単位区から導かれる特性値相互の相関が低くなるためと推測される。

第2節 単位区の大きさとそれから導かれた微地形特性値の特徴

地形の記載には従来幾つかの地形特性値が用いられてきた。それらは高度、傾斜、起伏量、谷密度、地形断面など(中野ら 1951)一般的な特性値から、さらに地形の特徴を記載するために relative slope (Gregory 1960)、curvature (Young 1964, Ahnert 1970)、concavity, convexity (Walker et al. 1968) などである。そして従来はこれらを単独に用い、あるいは数個を組み合わせて地形を区分してきた。しかし地形の形態はこれら特性値の集合としてあり、出来る限り多くの地形特性値を用いて形態を区分すべきである (Evans 1972, Speight 1976)。また区分対象のスケールに依ってつまり分類段階に依って地形特性値の抽出項目は相違し、その段階に適当な地形特性値を用いた方法が導入されるべきである。例えば地形カテナでの微地形を区分するとき谷密度は必要がなく、高次の段階の地形記載に用いられる。

本研究で抽出した微地形特性値は微地形の形態の側面を表現している。しかし植生、堆積有機物、土壌、風化岩礫など表層物質や地形形成作用を詳細に検討するためには集水面積や排水面積を、また表層物質の移動堆積を検討するためには3次元の空間一表面曲率量 (surface curvature volume) など実測する方法を開発する必要がある。本研究では排水面積、集水面積を単位区から計算し、相対的な意義を持つが、これらの実際の大きさは相当異なっていると思われる。

微地形特性値が表わす微地形の形態は第2章第1節の定義から明らかな様に、地形カテナから導かれる特性値は、微地形の地形カテナ上での位置関係と尾根と谷に対する傾斜を表わし、単位区から導かれる特性値は、微地形の面的な形態を表わしている。それ故に地形カテナから導かれる特性値は尾根と谷の標高差や斜距離が異なれば変化する。一方、単位区から導かれる微地形特性値は単位区の面積に依存して変化すると考えられる。このことからすると例えばある大きさの単位区の起伏指数は異なった大きさの単位区の起伏指数で表わされる値と意味が異なる。そこで単位区の大きさを変えて、これから導かれる9つの微地形特性値の変化を検討してみる。

この検討は実際に高原山の微地形を分類した調査地に隣接する上部に微凸型と微凹型、下部に微凸型のほぼ平行斜面 $60\text{ m} \times 60\text{ m}$ を用いた (図3-2-1)。検討は2つの方法で行い、第1の方法は $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ を単位に 100 m^2 、 400 m^2 、 900 m^2 、 1600 m^2 、 2500 m^2 、 3600 m^2 と単

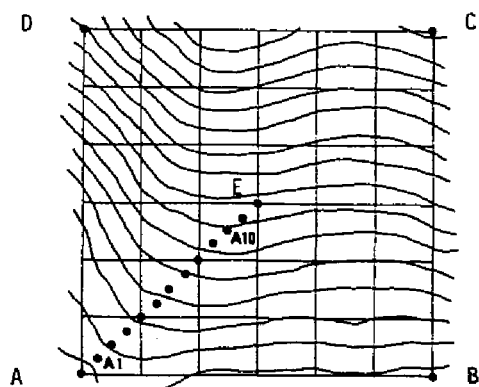


図3-2-1 単位区的面積と微地形特性値を検討した調査地の地形図($60\text{ m} \times 60\text{ m}$ 、●: 起点)

位区の面積を各交点(A、B、C、D)と中心E点から拡大し、特性値の変化を検討した(図3-2-2)。第2の方法はA点からA10へ、25 m²、100 m²、225 m²、400 m²、625 m²、900 m²、1225 m²、1600 m²、2025 m²、2500 m²と単位区を拡大する場合とA10地点から周囲へ100 m²、400 m²、900 m²、1600 m²、2500 m²と単位区を拡大して行く場合を検討した(図3-2-3)。

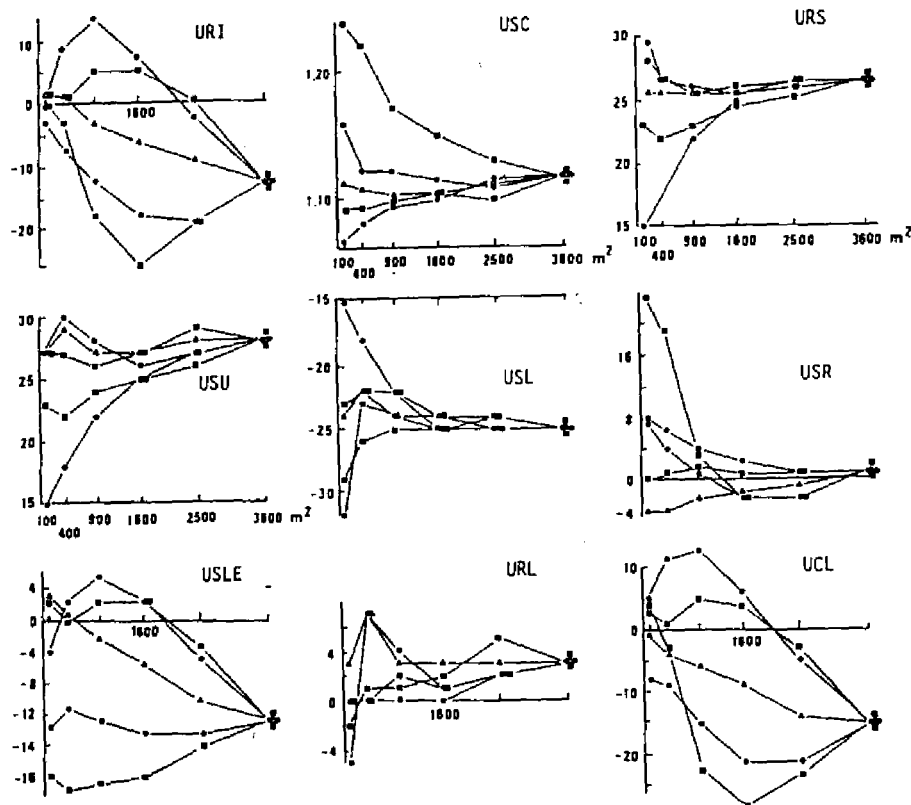


図3-2-2 単位区的面積と単位区から導かれる微地形特性値との関係
(●: A起点、□: B起点、○: C起点、■: D起点、△: E起点)

起伏指数は方形区8交点の標高差の合計で表わしたが、これを中心E点からの8交点に対する傾斜角の合計で表わした場合との関係は線形的な相関を示した(図3-2-4)。このことからどちらを用いてもほぼ同じ傾向が窺えるが計算の上で標高差合計の方が単純であると考えられる。

単位区から導かれる微地形特性値は図3-2-2と図3-2-3からも解るように単位区的面積が変わることによって変化した。これらの微地形特性値の変化を検討すると、第1の方法は最終的に単位区的面積が3600 m²となり、全ての起点からの測定面が同一になるため同じ微地形特性値を示した。起伏指数については最小単位100 m²では値に余り差がないが400 m²、900 m²と拡大すると値は変化し、この変化には一定の傾向は無かった。一方、中心E点からの値の変化は他の4点からの平均値的な傾向を示していた。面積がさらに拡大すると最終的にはこの試験地全域の値へと集束した。変化の傾向は起伏指数(URI)でみると、BとC起点からの変化は面積が拡大するに従い増加し、単位区のある大きさ(900 m²と1600 m²)以上になると減少した。同様にAとD起点からの起伏指数は面積が拡大するに従い減少し、ある面積(1600 m²)から増加した。この様に単位区的面積が変化するに従い、起伏指数は減少あるいは増加から増加あるいは減少と変化し、単位区のある面積で変曲点を示した。この変曲点は単位区の形態

の変換点を表わし、同じ形態がある面積まで示され、それ以上の面積になると異なる形態を示すことになる。この変曲点は同じ形態を持つ微地形の最大の面積を示すことになり、複数の変曲点が認められる場合、微地形の形態が変化に富む複雑性を示すものと考えられる。起伏指数－面積曲線はA～D方形区の凹凸を表わすばかりでなく、凹型、凸型を持つ微地形の面積を表すと考えられる。この傾向は他の8つの微地形特性値にも認められた。(単位区から導かれる微地形特性値)－(単位区的面積)曲線に示される変曲点は同形態の微地形の最大面積を表わすばかりでなく、複数の変曲点は地形カテナの複雑性をも示すと考えられる。

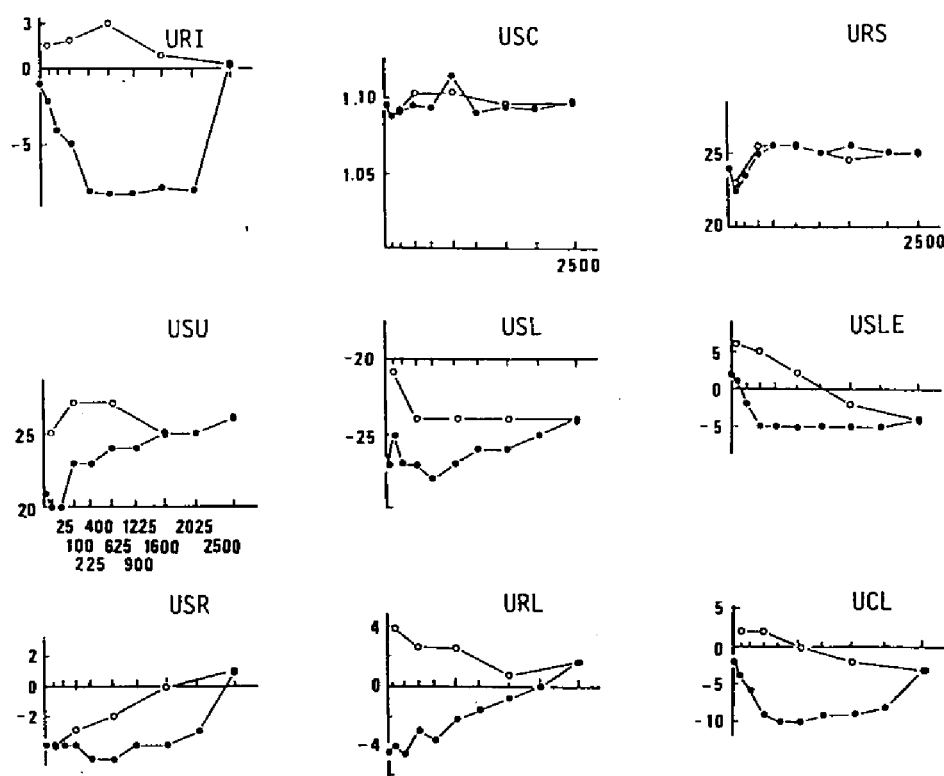


図3-2-3 単位区的面積と単位区から導かれる微地形特性値との関係
(○：A1起点からA10上部へ面積を拡大、●：A10起点から周囲へ面積を拡大)

第2の方法でも単位区が小さな面積から拡大すると上記と同じ傾向を示す。しかし、より小面積(URIで625 m²、USCで100 m²)でも変曲点が認められた。測量の中心点を変えずにA10起点から面積を拡大すると微地形特性値はほぼ一定の値(USC)を示すか、一定の増減(URI、URS、USU、USL、USR、USLE)を示した。また第1の方法で検討したE起点からも同様の結果を得た。この事は同質同形の微地形を記載する場合、その中心に測定点を設定し、単位区を測定することにより、正確に微地形の形態的特徴を数値化出来ることを指している。

モデル的に完全平行斜面－コンターが単位区内で平行であり、等間隔に増減する－を想定すると起伏指数(URI)、左右方傾斜角(USR、USLE)、縦断線型性(URL)、コンター線型性(UCL)は全て単位区的面積が変化しても0となり、相対傾斜(URS)はコンターの間隔

により定数（例えば s ）となり、上下傾斜も $\pm s$ と定数になる。表面曲率（USC）も $f(s)$ として面積の変化に対して定数となる。このため微地形は相対傾斜に依存した形態的特徴しか示さない。従って平行斜面では相対傾斜が微地形を表わす重要な微地形特性値と考えられる。表面が凹凸型を示す微地形は起伏指数などがこの形態を表現し、さらに（単位区から導かれた微地形特性値）－（単位区的面積）曲線によって同質の微地形の広がり決定出来る。

微地形の特性値は単位区の大きさにより変化した。そのため単位区の大きさは調査の目的に合った大きさを定め、相互の微地形の比較は同じ面積の単位区から導かれる特性値で行なわなければならないと結論された。

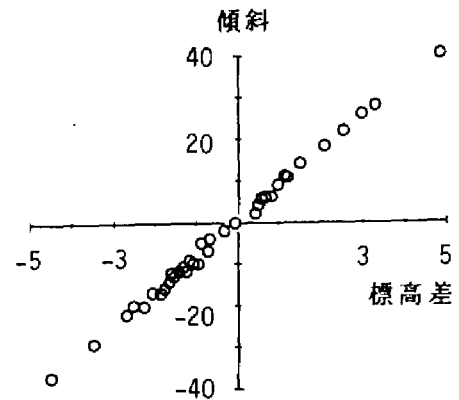


図 3-2-4 起伏指数算出における標高差と傾斜合計との関係

第 3 節 微地形の数値分類の意義

本研究は山地斜面の微地形を、地形カテナ（地形図）と単位区から導かれた 22 の微地形特性値を用いて数値化することにより分類を試みた。従来の山地斜面の分類ではなし得なかった微地形の形態を数値的に総合化した分類を行なうことが出来た。

本節では少数の特性値で記載されてきた既往の分類に対して、本研究で初めて試みた微地形の形態的特性の数値記載とそれを総合化した数値分類の意義について考察する。

第 1 項 数値的に明らかにした微地形の形態についての考察

微地形は尾根から谷にかけた地形カテナの構成要素とみなすことができ、従って、微地形の形態は地形カテナ上の位置と、微地形の面的な形態を記載することによって把握することが可能である。しかし、微地形の山地での広がりを考慮すると微地形の面的な形態の記載は困難である。従って、この定量的把握に関してはこれまでほとんど行なわれていない。しかしながら地形を小面積単位で区画することによって、各「単位区」毎の微地形の面的形態の数値化をはかることが可能と考えられる。そこで本研究においては、地形カテナから導かれる位置的な特性値と、単位区から導かれる面的な特性値を用い、微地形の形態的特性を数値化し、総合的な数値分類をすることによって、従来の定性的な分類の段階から、定量的分類の段階へとすすめることができた。

単位区という考え方の導入にあたって、注意を要する点は単位区的面積に依存して単位区から導かれる特性値が変化することにある。このため微地形相互の形態を比較する場合は同じ面積の単位区を用いて微地形特性値を導かねばならない。この単位区の大きさは地形調査の目的によって設定されるが、あまり広いと微地形の特徴を無視してしまう恐れがある。微地形特性値と単位区的面積との関係は、単位区から導かれる微地形特性値－単位区的面積曲線が変曲点を示すことにより地形カテナ上での同形態の微地形の広がり推定を可能にすることができた。

少数の特性値で行なわれてきた既往の微地形分類に対して、本研究ではなるべく多くの特性値を抽出して、微地形の形態の記載を行なった。しかし、これらの微地形特性値が微地形の分類に

有効であるかを検討する必要がある。そこで相関行列の各行の対角要素以外の最大値を共通性 (communality) として推定し、この共通性を検討した(表 3-3-1)。共通性は微地形特性値を基準変数とし、主成分を説明変数とした場合の重相関係数の平方和に一致する。これらの共通性は 6 つのいずれかの調査地で 0.65 以上の値を示し、全ての微地形特性値はいずれかの調査地で有意義と考えられた。しかし、方位、下方傾斜、排水面積の共通性は小さかった。従って、なるべく多くの特性値を用いて微地形を記載する方法として、本研究で取り上げた特性値は有効であると考えられた。

調査対象域を広げて、複数の地形カテナの微地形を区分すると、主成分の累積寄与率は低下することが明かとなった。また、十分な調査数がない場合、微地形の広がりや推定できず、この方法では微地形の分布を図示できない。それ故に、主成分分析による微地形分類は 1 地形カテナか複数の地形カテナかでその結果も相違する。そこで主成分分析による微地形の分類は調査地の大きさごとに再現性について検討する必要がある。1 地形カテナを対象とした高原山とアンドリュース実験林の主成分分析の結果は第 1 主成分と第 2 主成分で因子負荷量は多少異なるが、固有ベクトルの正負がほぼ一致した(表 3-1-1、表 3-1-4)。区分した微地形の特性は似ており、主成分分析の再現性があると考えられる。複数の地形カテナを対象とした上高地、屋久島、赤石山脈では第 1 主成分の固有ベクトルの正負はほぼ一致し、第 2 主成分の固有ベクトルの正負は相違するが、因子負荷量の大きい微地形特性値の固有ベクトルの正負はほぼ一致していた(表 3-1-10、表 3-1-13、表 3-1-16)。上高地、屋久島、赤石山脈の 3 つの調査地においてもほぼ主成分分析は再現性があると考えられる。

6 つの調査地で微地形の数値分類の結果から各微地形に共通な特性値の範囲をまとめた(表 3-3-2)。これは微地形を区分する場合の微地形特性値の基準範囲を示すものである。本分類法は従来の定性的な形態の評価に対し、数値としての形態の評価であるため、微地形相互間の比較を量的に、より詳細に行なうことが出来る。微地形はこれらの特性値を総合的に用いて区分することによってはじめて有効に分類ができると考えられる。

表 3-3-1 各試験地での微地形特性値の共通性 (communality)

微地形 特性値	共通性 (communality)					
	高原山	アンドリュース	三浦実験林	上高地	屋久島	赤石山脈
1 MCH	.98	.96	.94	.86	.97	.94
2 MDH	.98	.95	.93	.82	.87	.94
3 MCL	.98	.91	.96	.86	.97	.94
4 MDL	.98	.95	.93	.80	.87	.94
5 MCS	.97	.96	.70	.87	.79	.78
6 MDS	.82	.43	.74	.77	.67	.78
7 MRRL	.88	.89	.74	.87	.79	.78
8 AZI	.70	.44	.36	.45	.47	.16
9 USU	.89	.94	.86	.97	.91	.97
10 USL	.57	.74	.72	.52	.31	.27
11 USLE	.55	.62	.44	.94	.95	.89
12 USR	.61	.27	.41	.92	.95	.84
13 URI	.91	.83	.81	.95	.95	.94
14 USC	.95	.96	.74	.94	.86	.93
15 URL	.91	.83	.81	.77	.64	.34
16 UCL	.61	.76	.78	.95	.95	.94
17 UCA	.55	.96	.80	.61	.90	.70
18 UDA	.22	.16	.35	.65	.64	.13
19 URS	.95	.96	.86	.97	.91	.97
20 ALT	*	*	.92	.82	.32	.39
21 MRH	*	*	.99	*	*	*
22 MRL	*	*	.99	*	*	*

表 3-3-2 6 つの調査地での主成分分析による微地形区分と微地形単位別の主な微地形特性値の範囲

微地形 特性値	微地形単位					
	傾斜斜面	浸潤斜面	陽行斜面	通風斜面	崩壊斜面	沖積斜面
1 MRH	0-10	5-40	10-90	30-70	60-100	85-100
2 MRL	0-30	15-60	15-90	15-90	50-90	80-100
3 MCS	0-10	5-20	10-25	15-30	20-40	20-30
4 MDS	-35-20	-20-35	-20-35	-15-35	-10-30	0-15
5 MRRL	0-35	5-25	1-20	10-15	30-10	10-25
6 USU	0-10	5-15	10-30	15-45	10-40	0-35
7 USL	-5-15	-10-20	-20-40	-15-45	-10-35	-5-15
8 URI	0.0-20.0	1.5-5.5	-3.0-20.0	1.5-1.5	6.5-1.0	10.0-0.5
9 USC	1.01-1.15	1.03-1.10	1.10-1.24	1.10-1.27	1.03-1.25	1.01-1.15
10 URL	1.0-15.0	5.0-5.0	2.0-20.0	3.0-3.0	0-15.0	30.0-1.0
11 UCL	-2.0-50.0	6.0-15.0	-10.0-40.0	5.0-5.0	15.0-5.0	1.0-30.0
12 UCA	0-35	10-45	15-40	40-50	40-55	30-80
13 UDA	45-100	30-65	45-80	25-55	10-45	5-35
14 URS	0-10	5-20	15-35	20-45	10-35	0-20

第 2 項 微地形の分類の定義についての考察

地形はその形態的な地形要素の集合と、それらの地形要素を規定している地形因子との複合と

して理解される(熊木ら 1982)。ここで言う地形要素とは高度、断面型、傾斜、集水面積、周囲の地形との位置関係など、本研究で微地形特性値として扱ったものであり、地形因子とは地形形成因子と考えられ、営力と物質構成などである。地形分類に関して羽田野(1971)は、地形を系統的に分類するためには地形因子の質的な相違と、それを反映している地形要素の量的な不連続を見いだし単位地形の境界とすると簡潔に要点をあげている。一方、熊木・羽田野(1982)は、地形の分類では応用面の有効性や他の要素との関連性の検討が先行したため、地形分類の統一性や論理性が犠牲にされたと指摘している。しかしこの事は地形の記載が十分でなかったこと、対象のスケールが不明瞭であったこと、地形形態と地形形成作用について混同した面があったこと、地形に関連した土壌から地形形成作用を十分検討しなかったことなどの原因によると考えられる。そこで地形の詳細な記載を行い、これらをもって総合的に地形を区分し、地形と土壌・植生の関係を明らかにすることによって、そこに介在する地形形成作用を地形の単位として取り出して、区分することにより地形分類の統一性、論理性を見いだすことが出来るものと思われる。

従来の微地形の分類と本研究で用いた9つの微地形分類を照合すると表3-3-3となる。我国で報告された微地形の分類は、本来山地地形が複雑であるにもかかわらず残積斜面と浸潤斜面との区別、運積斜面と崩積斜面との区別、崩積斜面と沖積斜面との区別など特徴的な微地形の区分を往々にして欠いていた。これに対してDalrympleら(1968)の9つの微地形分類は地形カテナ上での微地形をよく区分していると考えられる。しかし彼らの形態的な定義は傾斜と凹凸の記載だけであった。本研究では微地形特性値を用いて微地形を数値分類し、新たに形態の数値的特徴を明確にした。さらに地形は形態と地形形成

表3-1-3 新しく命名された微地形単位と従来区分されてきた微地形単位との照合(対応関係は著者による)

新命名	Dalrymple	山田(1955)	久保(1961)	竹下(1961)	田村(1974)
残積斜面	Interfluvial	E型 山頂平坦凸地	山頂緩斜面	尾根型斜面	頂部斜面
浸潤斜面	Seepage slope	F型(D型) 山頂急斜凸型	山頂緩斜面	尾根型斜面	頂部斜面
匍行斜面	Convex creep slope	D型(F型) 山頂急斜凸型	斜面 凸型斜面	尾根型斜面	山頂斜面 谷壁斜面
自由斜面	Fall face		斜面 凹型斜面	中間型斜面	谷壁斜面
運積斜面	Transportational midslope	C型 中間緩斜凹型	斜面 複合斜面	中間型斜面 谷型斜面	谷頭凹地
崩積斜面	Colluvial footslope	B型 中間緩斜凹型	山麓緩斜面 扇状地 凹型斜面	谷型斜面	谷頭凹地
沖積斜面	Alluvial footslope	A型 谷間平坦凹型	山麓緩斜面 谷底低地	谷型斜面	谷頭平底
溶食斜面	Channel wall		崖壁		
洪涵斜面	Channel bed		山麓緩斜面 洪かん地		水路

作用との複合として考えられるため地形形成作用の面からも微地形を定義付ける必要がある。Dalrympleらも9つの微地形単位について斜面の構成物質の動態から定義しているが、田村(1974)はさらに詳細に各微地形における水の動態、侵食作用、地形変化を考察しており、本研究では両者を併せて微地形の定義とした。山地斜面で、土壌や水の動態、地形変化を検証して行く必要がある。

水と土壌の動態を考慮した微地形の定義に従って、尾根から谷にかけての地形カテナを考えると、そこにおける基本的な微地形の出現序列は残積斜面-浸潤斜面-匍行斜面-自由斜面-運積斜面-崩積斜面-沖積斜面-溶食斜面-洪涵斜面となる。本研究では自由斜面、溶食斜面、洪涵斜面を調査から除いたが、現実における微地形の出現序列は各調査地で相違し、基本的な出現序列とも相違した。例えば地滑りが起き、匍行斜面の上部に凹型面が生じた場合そこでの微地形は運積斜面あるいは崩積斜面に区分される可能性がある。この様な場合、微地形の出現序列は浸潤斜面-運積斜面あるいは崩積斜面-匍行斜面となる。この事から微地形の出現序列が基本的な序列と相違した場合にはなんらかの地形形成作用など地形の変化を過去に受けたと推定することが

出来る。また基本的な微地形の組合せを欠いた場合も斜面の発達が十分でないか、過去に斜面の変化があったと推定される。この様に地形カテナ上での微地形の出現序列と組合せは斜面発達過程や地形形成作用を推定する指標的特性と考えられる。

第4節 要 約

1. Dalrymple et al. (1968)の9つの地形単位を応用して微地形の数値分類を行なった。この分類は地形の形態と表層物質の動態で定義づけられている。さらに田村(1974)の各地形における水の動態、侵食作用、地形変化についての説を併せて分類の定義とした。
2. 山地斜面の尾根から谷にかけた地形カテナを対象とし、微地形を地形カテナの最小単位として考えた。
3. 微地形の形態を定量的に評価するため、地形カテナ（あるいは地形図）と単位区から導かれる微地形特性値で数値的に記載した。
4. 微地形特性値を用い、主成分分析により数値分類した。主成分分析の結果からスコアー散布図をつくり、微地形単位を区分し形態的特徴を抽出した。
5. 6カ所の調査地から区分した微地形の特性値を微地形別にまとめると微地形特性値の範囲が定められた。これらの値は微地形の形態の数値分類の基準値として応用が出来ると考えられた。
6. 本研究で分類した微地形は従来の分類より残積斜面と浸潤斜面、運積斜面と崩積斜面、崩積斜面と沖積斜面の区別が詳細であった。
7. 複数の地形カテナを含む区分では主成分分析での累積寄与率が低下した。特に地形カテナから導かれた特性値と単位区から導かれた特性値相互の相関が低下した。
8. 微地形の組合せ、出現序列は斜面の形成過程や履歴を表すと推定された。
9. 単位区から導かれる特性値は単位区の面積に依存して変化した。そのため微地形相互の比較では同じ面積の単位区を用いなければならない。単位区から導かれる微地形特性値－単位区面積曲線は変曲点を示し、同形態の微地形の最大の面積を表わした。またこの曲線により地形カテナの複雑性も推定されると考えられた。

第4章 微地形と土壌、植生並びに伐採による土壌の変化との関係

第1節 微地形に関連した土壌の諸性質並びに土壌型の分布

第1項 褐色森林土

高原山の火山灰母材の褐色森林土と微地形との関係を調べた。ここでは5つの土壌型が認められた。土壌型と微地形との間には次の関係が認められた(図4-1-1)。

乾性褐色森林土(粒状、堅果状構造型-B_B型)

適潤性褐色森林土偏乾亜型(B_{D(d)}型)

弱乾性褐色森林土(B_C型)~B_{D(d)}型

適潤性褐色森林土(B_D型)

B_D型土壌

弱湿性褐色森林土(B_E型)

微地形と褐色森林土の土壌型との対応関係が明かであった。一方、同じ土壌型が幾つかの微地形にわたって認められた。例えばB_{D(d)}型土壌は浸潤斜面と匍行斜面(2)に、B_D型土壌は運積斜面と崩積斜面に分布した。B_B型、B_E型土壌に比較してB_{D(d)}型やB_D型の分布域は広いと考えられた。

土壌表層の断面形態と物理化学性を分析し、それらの値を主成分分析すると、第3主成分の固有値は3.79、累積寄与率は64.9%を示し、総合特性値と考えられる。第1主成分には主に断面形態と化学性が、第2、第3主成分には物理性が表現されている。この第1主成分

- 残積斜面
- 浸潤斜面
- 匍行斜面(1)(2)
- 運積斜面
- 崩積斜面
- 沖積斜面

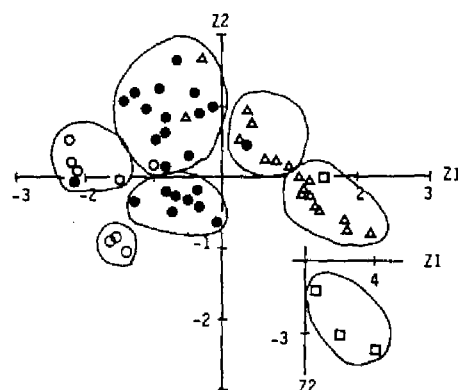


図4-1-1 高原山での褐色森林土の土壌型と微地形の対応関係—微地形特性値による主成分分析のスコア散布図への土壌型の図示

(○: B_B, ○: B_C~B_{D(d)}, ●: B_{D(d)}, △: B_D, □: B_E)

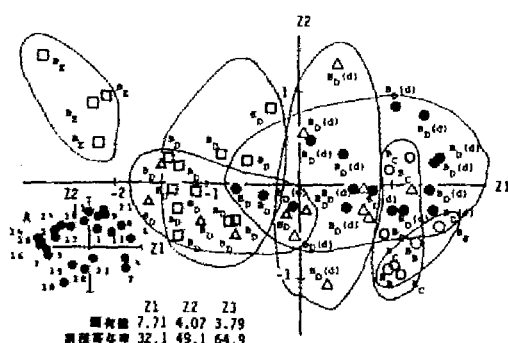


図4-1-2 高原山での褐色森林土の土壌特性値を用いた主成分分析の第1主成分と第2主成分のスコア散布図。記号は微地形単位を表す。Aは第1主成分と第2主成分への因子負荷量の散布図。数字は表4-1-1に従う。

(○: 残積斜面、△: 浸潤斜面、○: 匍行斜面(1)、●: 匍行斜面(2)、△: 運積斜面、□: 崩積斜面、□: 沖積斜面)

表4-1-1 高原山における微地形別の褐色森林土の特性値

土壌特性値	沖積斜面	崩積斜面	運積斜面	浸潤斜面(2)斜面	匍行斜面(1)斜面	残積斜面
1 Ae Thickness*	6.0	2.8	1.4	3.8	4.2	4.8
2 A Thickness	18.3	15.1	10.4	9.8	8.8	8.7
3 Gravel	27.2	30.0	28.7	5.7	6.3	0.3
4 Root	0.4	0.8	1.6	2.5	2.3	3.3
5 pH(Water)	5.66	4.92	4.90	4.59	4.49	4.74
6 Ys	1.9	15.4	16.4	27.9	21.2	16.8
7 C/N ratio	17.7	18.5	20.0	21.3	21.2	22.5
8 Total Carbon	12.78	12.61	14.82	17.48	15.28	17.47
9 Total Nitrogen	0.72	0.68	0.75	0.82	0.72	0.78
10 Inorganic N	2.32	2.48	1.95	2.11	2.46	1.02
11 NH ₄ -N	0.61	0.57	0.76	1.33	1.22	0.93
12 NO ₃ -N	1.71	1.91	1.18	0.77	1.24	0.09
13 C.E.C.	52.0	47.6	45.0	49.4	44.9	46.6
14 ex.Ca	21.72	8.64	8.32	4.47	4.24	2.30
15 ex.Mg	3.64	2.04	2.19	0.98	0.90	0.77
16 ex.K	1.92	1.27	1.15	0.95	0.87	0.85
17 Permeability	690	385	425	445	527	386
18 Bulk Density	37.7	41.0	43.7	33.5	39.1	35.1
19 Moisture Cont.	46.7	43.1	40.5	42.2	43.3	43.4
20 Water Max.	64.1	63.1	60.9	64.1	63.5	63.5
21 Air Min.	19.9	19.1	19.9	20.3	19.5	20.0
22 Coarse Porosity	46.2	47.9	47.7	48.2	47.1	45.0
23 Fine Porosity	37.7	34.4	33.1	36.1	35.8	38.5

*単位: Ae, A: cm, Gravel, Root: g/400cc, Total Carbon, Nitrogen: %, Inorg. N, NH₄-N, NO₃-N: mg/100g dry soil, C.E.C.: ex. Ca, ex. Mg, ex. K: me/100g dry soil, Permeability: cc/min., Bulk Density, Moisture Cont., Water Max., Air Min., Coarse & Fine Porosity: %

と第2主成分のスコア散布図から検討すると土壌型は土壌の物理化学性の特徴をよく反映しており、微地形とも対応した(図4-1-2)。特にB_g型とB_e型土壌では明瞭であった。一方、B_{D(d)}型とB_D型土壌の物理化学的性質には相当の幅を示し、幾つかの微地形にまたがり分布した。しかし微地形毎に同じ土壌型の物理化学性は特徴的傾向を示した。浸潤斜面のB_{D(d)}型土壌は物理性の値に大きな偏差を示すが化学性の偏差は小さかった。匍行斜面(1)のB_{D(d)}型土壌は化学性に大きな偏差を示すが物理性の偏差は小さかった。同様に運積斜面のB_D型土壌は化学性に大きな偏差を示すが物理性の偏差は小さく、崩積斜面のB_D型土壌はその逆であった。このことは土壌型の細区分が微地形単位を用いて可能であることを示唆する。

微地形別に土壌の諸性質を検討すると、残積斜面の土壌はA層が薄く、C/N比が最も高く、無機態窒素は最小で、C、E、C₁は低く、置換性塩基類は最小であった(表4-1-1)。浸潤斜面ではpHが最も低く、無機態窒素量も多く、透水性は沖積斜面について高かった。匍行斜面の土壌は(1)と(2)で多少相違するが、A層に含まれる根が最多で、全炭素も多く、細孔隙も多かった。匍行斜面(2)ではアンモニア態窒素が最も多かった。匍行斜面(2)に続く運積斜面との間で土壌の諸性質に大きな差がある。運積斜面より下部では表層の根の量が減り礫の量が大きく増加した。A層は厚くなり、pHも高くなった。置換性塩基類は極端に増加した。そのため運積斜面上部は微地形の変換点と考えられ、同時に土壌の物理化学的性質の変換点でもある。運積斜面の土壌は上記の特徴を示し、特に石礫の含量が高く容積重が高かった。崩積斜面の土壌は全炭素量、最小容気量とも最も少なく、硝酸態窒素が最も多かった。沖積斜面の土壌はA₀層、A層とも最も厚く、pHは最も高かった。Y₁、C/N比は最低となり、C、E、C₁、置換性塩基類、透水性は最高を示した。

表4-1-2 高原山における褐色森林土の土壌特性値と微地形特性値の相関行列

	微地形特性値																		
土壌 特性値	MCI	MMI	MCL	MDL	MCS	MDS	MEBL	AZI	USU	USL	USLE	USR	URT	USC	URL	UCL	UCA	UDA	URS
A ₀ (%78)	-.22	.22	-.28	.31	-.31	.50	.13	-.33	-.45	.49	-.04	.15	.09	-.57	.03	.09	-.27	-.22	-.53
A(%78)	.77	-.77	.72	-.70	.69	.60	.79	.34	.41	.01	.04	.33	.49	.21	.46	.32	.35	-.26	.22
Gravel	.70	-.70	.68	-.69	.68	.16	.51	.52	.58	-.19	.07	.26	.16	.44	.43	.29	.23	-.05	.43
Root	-.75	.75	-.72	.71	-.73	-.30	-.69	-.44	-.50	.10	-.02	-.27	-.44	-.28	-.44	-.25	-.37	.25	-.35
pH(water)	.63	-.63	.60	-.58	.51	.52	.63	.36	.35	.21	.09	.13	.58	.17	.61	.19	.29	-.17	.08
Y ₁	-.43	.43	-.37	.35	-.32	-.42	-.46	-.10	-.21	-.20	.13	.17	-.38	-.05	-.45	-.25	-.28	.21	-.00
C/N ratio	-.83	.83	-.82	.80	-.81	-.49	-.79	-.47	-.58	.22	-.03	.41	.14	-.30	-.38	-.39	-.40	.11	-.45
Total C	-.50	.50	-.47	.48	-.43	-.25	-.42	-.32	-.31	.02	.11	-.39	.45	-.18	-.32	-.44	-.26	.21	-.19
Total N	-.15	.15	-.13	.14	-.09	-.04	-.08	-.13	-.07	-.07	.11	-.23	-.28	-.01	-.18	-.29	-.10	.16	.00
Inorg. N	.41	-.41	.44	-.42	.53	.18	.43	.17	.40	-.34	.10	.03	.17	.34	.15	.12	.37	-.14	.47
NH ₄ -N	-.33	.33	-.26	.26	-.19	-.25	-.27	-.18	-.04	-.13	-.07	-.24	-.29	-.05	-.21	-.28	-.14	.12	.05
NO ₃ -N	.64	-.64	.62	-.60	.67	.36	.62	.30	.52	-.25	.15	.20	.37	.38	.29	.31	.47	-.23	.44
C.E.C.	.19	-.19	.20	-.17	.23	.26	.30	.01	.16	-.06	-.09	-.08	.01	.10	.09	-.15	.11	-.03	.12
ex.Ca	.70	-.70	.67	-.65	.65	.59	.76	.40	.63	.12	.16	.06	.65	.28	.71	.19	.41	-.26	.23
ex.Mg	.71	-.71	.69	-.68	.67	.43	.67	.47	.56	.01	.15	.07	.58	.35	.62	.18	.42	-.20	.31
ex.K	.71	-.71	.70	-.68	.66	.57	.76	.50	.54	.09	.20	.12	.66	.30	.69	.27	.44	-.34	.24
Permeability	.03	-.03	.02	-.00	.05	.25	.19	-.16	.09	.11	-.08	.02	.16	-.00	.23	-.04	.04	-.22	-.00
Bulk density	.25	-.25	.25	-.27	.25	-.05	.11	.29	.25	-.00	-.02	.19	.28	.13	.28	.15	.20	-.10	.14
Moisture	.24	-.24	.23	-.23	.23	.26	.31	-.06	.16	.03	.11	.17	.24	.00	.21	.03	.19	-.14	.04
Water Max.	.02	-.02	.01	-.01	.01	.13	.09	-.11	-.01	-.00	.11	-.05	-.02	-.02	-.02	-.14	-.00	.00	-.03
Air Min.	-.09	.09	-.09	.10	-.09	.01	-.04	-.04	-.09	.01	.10	-.00	-.08	-.05	-.09	.08	-.05	-.01	-.04
Coarse P.	.01	-.01	.01	-.00	.01	-.00	.00	.06	-.01	-.07	.05	-.05	-.12	.08	-.09	.00	-.02	.00	.06
Fine P.	-.12	.12	-.12	.13	-.12	.17	.03	-.26	-.13	.10	-.04	-.00	.01	-.20	-.04	-.04	-.04	-.01	-.16
A(%79)	.57	-.57	.51	-.48	.49	.67	.72	.15	.24	.21	.03	.37	.53	-.02	.48	.35	.31	-.38	.02

土壌の諸性質と微地形特性値の相互の関係は表4-1-2に示す。土壌の物理性に対して微地形特性値は相関を示さなかった。A層厚、礫量、根量、pH、C/N比、硝酸態窒素、置換性塩基類は地形カテナから導かれる位置関係と傾斜の特性値に±0.6以上の相関を示した。単位区から導かれた特性値の起伏指数はpHと置換性塩基量に、表面曲率はA₀層厚に相関を示した。

褐色森林土をもう一つの調査地である花崗岩母材の屋久島（白谷保存林、屋久杉ランド、下屋久宮林署第9林班）で検討した。ここでは5つの土壌型が認められた。土壌型と微地形との対応関係は明瞭であった（図4-1-3）。

乾性弱ポドゾル化土壌（ P_{DIII} 型）～乾性褐色森林土（ B_B 型）

B_B 型土壌～適潤性褐色森林土偏乾亜型（ $B_{D(d)}$ 型）

$B_{D(d)}$ 型土壌

適潤性褐色森林土（ B_D 型）

B_D 型土壌

弱湿性褐色森林土（ B_E 型）

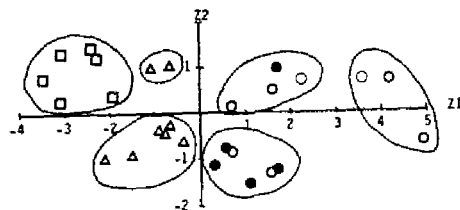


図4-1-3 屋久島での褐色森林土を主とする土壌型と微地形の対応関係—微地形特性値による主成分分析のスコア—散布図への土壌型の図示

(○: P_{DIII} , ○: $B_B \sim B_{D(d)}$, ●: $B_{D(d)}$, △: B_D , □: B_E)

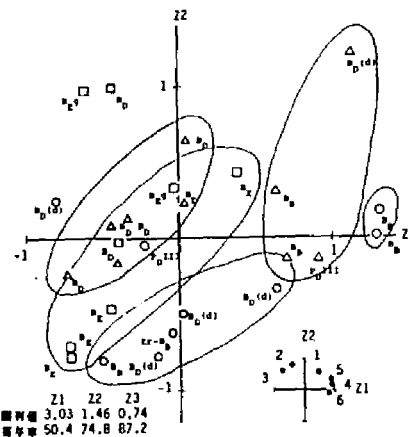


図4-1-4 屋久島での褐色森林土の土壌特性値を用いた主成分分析の第1主成分と第2主成分のスコア—散布図。記号は微地形単位を表す。Aは第1主成分と第2主成分への因子負荷量の散布図。数字は表4-1-3に従う。

(○: 残積斜面、△: 浸潤斜面、○: 匍行斜面、△: 運積斜面、□: 崩積斜面、□: 沖積斜面)

それぞれが対応していた。高原山と屋久島では $B_{D(d)}$ 型土壌が浸潤斜面と匍行斜面に分布し、 B_D 型土壌が運積斜面と崩積斜面に分布した。これは先に述べたように地形カテナ上で2つの土壌型が広く分布することによるもので、土壌の物理化学性の値の偏差から微地形別に土壌型の細分が可能であると推定された。

土壌の諸性質で主成分分析をすると土壌型と微地形別に特徴が示された（図4-1-4、表4-1-3）。第2主成分の固有値は1.46、累積寄与率は74.8%であった。第1主成分は正にC/N比、全炭素、全窒素を表わし、第2主成分は正にPHとA層厚を主に表わした。

乾性型の褐色森林土は第1主成分の正の象現に分布し、湿性型の褐色森林土は第1主成分と第2主成分とが負の象現に分布した。土壌の特性値で区分された土壌型は微地形ともよく対応した。

表4-1-3 屋久島における微地形単位別の褐色森林土を主とする土壌特性値

土壌特性値	微地形単位					
	残積斜面	浸潤斜面	匍行斜面	運積斜面	崩積斜面	沖積斜面
1 A ₀ 層厚	2.7	4.2	1.9	2.7	1.8	2.5
2 A ₁ 層厚	12.8	11.4	8.9	20.4	35.0	17.8
3 pH	3.60	4.01	3.91	4.29	4.39	4.39
4 全炭素	29.46	27.23	13.05	11.85	13.87	11.11
5 全窒素	1.31	1.43	0.70	0.77	0.79	0.66
6 C/N	21.6	19.2	18.4	15.3	18.0	13.4

残積斜面の土壌はPHが最も低く、全炭素・全窒素の含有率が高く、C/N比も高かった。浸潤斜面ではA₀層が最も厚かった。匍行斜面の土壌はA₀、A層とも最も薄かった。運積斜面でA層は厚くなり、全炭素・全窒素の含有率は低くなった。崩積斜面のA層は最も厚く、PHも高かった。沖積斜面の土壌はC/N比は最も小さく、PHは最も高かった。しかし沖積斜面のA層は運積斜面や崩積斜面に比較して薄く、高原山の沖積斜面とは相違していた。

第2項 乾性ポドゾル

赤石山脈の2000m以上の標高では乾性ポドゾル土壌が支配的に分布した。湿性ポドゾルの出現は少なく、標高が低くなると褐色森林土・暗色系褐色森林土が分布した。土壌の断面調査から5つの土壌群と9つの土壌型が主に認められた。微地形との関係を相対高の順にみると、

乾性ポドゾル (P_{DI}型)

——残積斜面

乾性ポドゾル化土壌 (P_{DII}型) ~ 乾性弱ポドゾル化土壌 (P_{DIII}型)

——匍行斜面

P_{DI}型土壌 ~ P_{DII}型土壌

——浸潤斜面

P_{DIII}型土壌 ~ P_{DII}型土壌

——運積斜面(1)(2)

P_{DIII}型土壌 ~ 暗色系褐色森林土 (dB型) ~ 褐色森林土

~ 湿性腐植型弱ポドゾル化土壌 (P_{w(h)III}型)

——崩積斜面

未熟土 (I_m型) ~ 褐色森林土 (B型)

——沖積斜面

という対応が認められた(図4-1-5)。乾性ポドゾルの典型P_{DI}型は残積斜面、浸潤斜面、匍行斜面に分布した。運積斜面と崩積斜面では乾性弱ポドゾル化土壌が優占し、土壌のポドゾル化は強くなかった。沖積斜面は集水傾斜(MCS)が25°以上を示し、この微地形での土壌は不安定なため未熟土が多く認められた。乾性ポドゾルは垂直成帯性を持つとされ(加藤、橋本1978)標高が1800m以下の場所では凸型の強い匍行斜面に一部乾性ポドゾルが認められた。

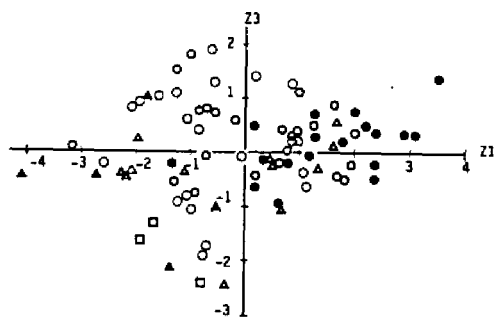


図4-1-5 赤石山脈での乾性ポドゾルを主とする土壌型と微地形の対応関係—微地形特性値による主成分分析のスコア—散布図への土壌型の図示

(●: P_{DI}, ○: P_{DII}, □: P_{DIII}, ▲: dB, □: I_m, △: その他)

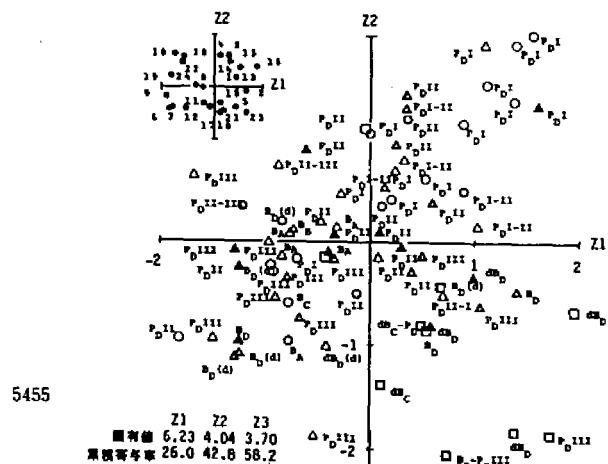


図4-1-6 赤石山脈での乾性ポドゾルを主とする土壌の特性値を用いた主成分分析の第1主成分と第2主成分のスコア—散布図。記号は微地形単位を表す。Aは第1主成分と第2主成分への因子負荷量の散布図。数字は表4-1-4に従う。(○: 残積斜面、○: 匍行斜面、△: 浸潤斜面、△: 運積斜面(1)、□: 崩積斜面、▲: 運積斜面(2)、□: 沖積斜面)

一方、褐色森林土は標高 2 1 0 0 m まで分布した。

表層土壌の断面形態と物理化学性の特徴値を用いた主成分分析の結果は第 3 主成分の固有値が 3. 7 0、累積寄与率が 5 8. 2 % となり、総合特性値として考えられた。第 1 主成分と第 2 主成分でスコア散布図を検討する (図 4 - 1 - 6)。第 1 主成分は正に P H、負に全炭素、全窒素、塩基置換容量など主に化学性を表わし、第 2 主成分は正に溶脱層、集積層、細孔隙が、負に礫、粗孔隙など主に断面形態や物理性を表わしていた。乾性ポドゾルは第 1、第 2 主成分とも正の値を示す象限に分布し、主に残積斜面であった。A₀、A₂、B₂層とも厚く、A層中の全炭素量に比較してB層中の全炭素量が多く、容積重が高いことが示された。乾性弱ポドゾル化土壌は第 1、第 2 主成分とも負か第 2 主成分が正の象限に分布し、全炭素・全窒素とも多く置換性カリウム、マグネシウムが比較的多かった。一方、ポドゾル化を受けていない暗色系褐色森林土は第 1 主成分が正で第 2 主成分が負の値を示す象限に分布する。この土壌の特徴は置換性カルシウムが多く、A層が厚く、透水性が最大であった。乾性弱ポドゾル化土壌、暗色系褐色森林土がこの象限に分布し、これらの土壌型は土壌特性値が似ていた。

表 4 - 1 - 4 赤石山脈における微地形別の乾性ポドゾルを中心とした土壌特性値

土壌 特性値	微地形単位							
	残積 斜面	匍行 斜面	浸潤 斜面	運積 斜面(1)	崩積 斜面(2)	沖積 斜面	沖積 斜面	
1 A ₀ 層厚	8.8	5.2	6.3	7.1	6.3	5.7	4.5	(cm)
2 A ₂ 層厚	15.5	18.3	12.7	17.4	27.4	14.1	24.5	(cm)
3 溶脱層厚	11.9	13.7	8.5	8.2	0	6.4	3.9	(cm)
4 集積層厚	18.3	12.8	13.0	8.6	0	12.8	10.3	(cm)
5 pH	3.72	3.63	3.85	3.95	4.54	3.93	4.33	
6 全炭素	9.23	9.67	10.80	8.96	6.58	9.35	6.51	(%)
7 全窒素	0.51	0.58	0.62	0.55	0.47	0.57	0.51	(%)
8 C/N	18.2	16.9	17.9	16.8	14.0	16.4	12.3	
9 C.E.C.	35.1	38.4	38.7	35.6	24.8	36.5	27.2	(me/100g)
10 ex-Ca	0.72	0.59	1.55	1.14	3.41	1.52	1.77	(me/100g)
11 ex-K	0.30	0.38	0.38	0.42	0.53	0.41	0.24	(me/100g)
12 ex-Mg	0.44	0.48	0.59	0.49	0.55	0.59	0.43	(me/100g)
13 B ₀ /A ₀ C [*]	1.21	0.84	0.65	0.69	0.71	0.84	0.79	
14 B ₀ /A ₀ C ^{**}	1.09	1.07	1.00	1.08	0.94	1.08	1.25	
15 透水性	362	418	370	404	719	292	408	(cc/min.)
16 容積重	40.0	36.1	43.8	38.4	39.3	41.6	43.4	
17 粗孔隙	43.4	43.2	39.7	42.3	41.6	42.7	39.3	(%)
18 細孔隙	30.5	32.8	32.9	29.6	19.8	31.3	29.3	(%)
19 全孔隙	73.8	76.0	72.5	71.8	61.4	74.0	68.6	(%)
20 最大容水量	52.5	52.8	55.5	53.7	39.2	57.4	51.5	(%)
21 最小容水量	21.3	23.2	17.1	18.2	22.2	16.7	17.0	(%)
22 採取水分量	34.7	37.2	37.0	35.7	24.1	35.4	33.7	(%)
23 比重	85.3	60.1	79.6	125.2	264.9	73.0	163.9	(g/400cc)
24 比重	5.1	7.1	6.0	4.8	4.6	5.7	2.8	(g/400cc)
No of PloLa	14	8	18	15	6	10	5	

*: (集積層の全炭素量) / (溶脱層の全炭素量)
 **: (集積層のC/N) / (溶脱層のC/N)

微地形単位別に土壌の特性値を検討すると(表 4 - 1 - 4)、残積斜面のA₀層が最も厚く、運積斜面(1)がそれに続いた。A層は崩積斜面で最も厚く、ポドゾル化の強さを示す溶脱層(A₂層)は残積斜面と匍行斜面が顕著に厚い傾向を示した。全炭素は浸潤斜面が最も多く、沖積斜面で最も少なかった。C/N比は残積斜面が最も高く、沖積斜面で最も低かった。置換性塩基類は崩積斜面が多く、沖積斜面で最も少なかった。透水性は崩積斜面が最も高く、容積重は浸潤斜面で最も高かった。高原山と同様に残積斜面、浸潤斜面、匍行斜面の土壌に対して運積斜面、崩積斜面、沖積斜面の土壌は礫量、P H、置換性カルシウム、C/N比に顕著な相違があることが認められた。

乾性ポドゾルを詳細に検討するため、野呂川越地形カテナを例にとり、遊離酸化鉄、遊離酸化アルミニウム、粘土鉱物組成を分析した(図 4 - 1 - 7)。残積斜面(仙-2)と浸潤斜面(仙-5)の乾性ポドゾルは鉄とアルミニウムが土壌表層で溶脱し、B層で集積する傾向が明らかで、この地形カテナでの鉄、アルミニウムの溶脱・集積の強さはP_{DI} > P_{DII} > P_{DIII}となっていた(表

表 4-1-5 野呂川越地形カタナにおける微地形別の
の土壌の諸特性

Plot	層位	pH	全炭素	全窒素	遊離酸化鉄 (Fe ₂ O ₃)	遊離酸化アルミニウム (Al ₂ O ₃)
仙-1 (山-1)	A ₁	3.90	11.10	0.71	2.29*	1.94**
	A ₂	4.30	7.00	0.44	5.12	2.70
	B ₂₁	4.68	7.03	0.37	6.06	3.73
	B ₂₂	4.91	4.78	0.26	4.81	2.67
仙-2 (山-2)	A ₁	3.69	26.32	1.22	1.87	1.21
	A ₂	3.99	8.14	0.44	2.09	1.49
	B ₂₁	4.58	8.67	0.43	7.21	3.39
	B ₂₂	4.79	4.78	0.26	4.39	2.53
仙-3 (山-3)	A	4.04	8.93	0.58	2.84	2.02
	B ₁	4.39	6.52	0.41	2.37	1.93
	B ₂	4.93	2.42	0.20	2.77	2.07
	BC	5.21	0.57	0.09	1.41	1.00
仙-4 (山-4)	A	4.10	9.31	0.52	2.67	1.80
	B ₁₁	4.41	7.23	0.41	3.05	2.05
	B ₁₂	4.79	7.47	0.40	4.05	2.19
	B ₂	4.79	7.47	0.40	4.05	2.19
仙-5 (山-5)	A ₂	3.70	7.09	0.33	1.56	0.53
	B ₂₁	4.01	9.75	0.41	6.47	4.29
	B ₂₂	4.70	7.51	0.31	5.40	2.70
	B ₃	4.90	2.85	0.16	4.80	2.43
仙-6 (山-6)	A ₂	4.11	7.13	0.43	2.24	1.17
	B ₂₁	4.39	4.96	0.29	3.09	1.89
	B ₂₂	4.19	6.60	0.42	4.38	3.37
	B ₃	4.81	2.59	0.23	3.20	2.01
		Σ	Σ	Σ	Σ	Σ

*: Mehra-Jackson法, **: Tamme法

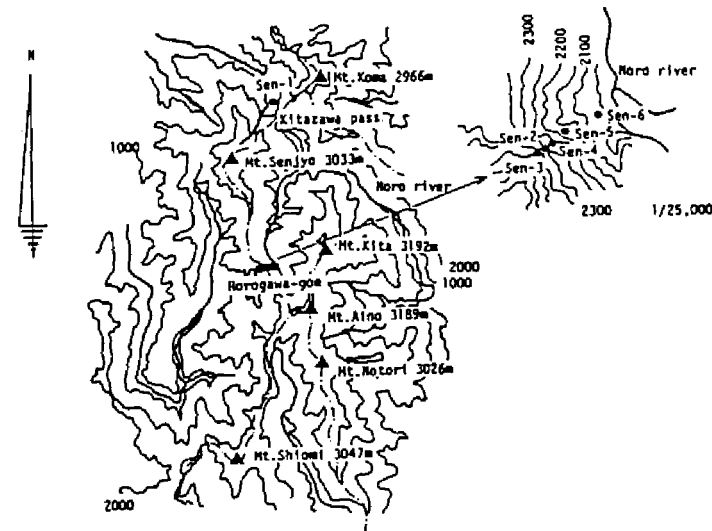


図 4-1-7 赤石山脈野呂川越地形カタナにおける調査地点

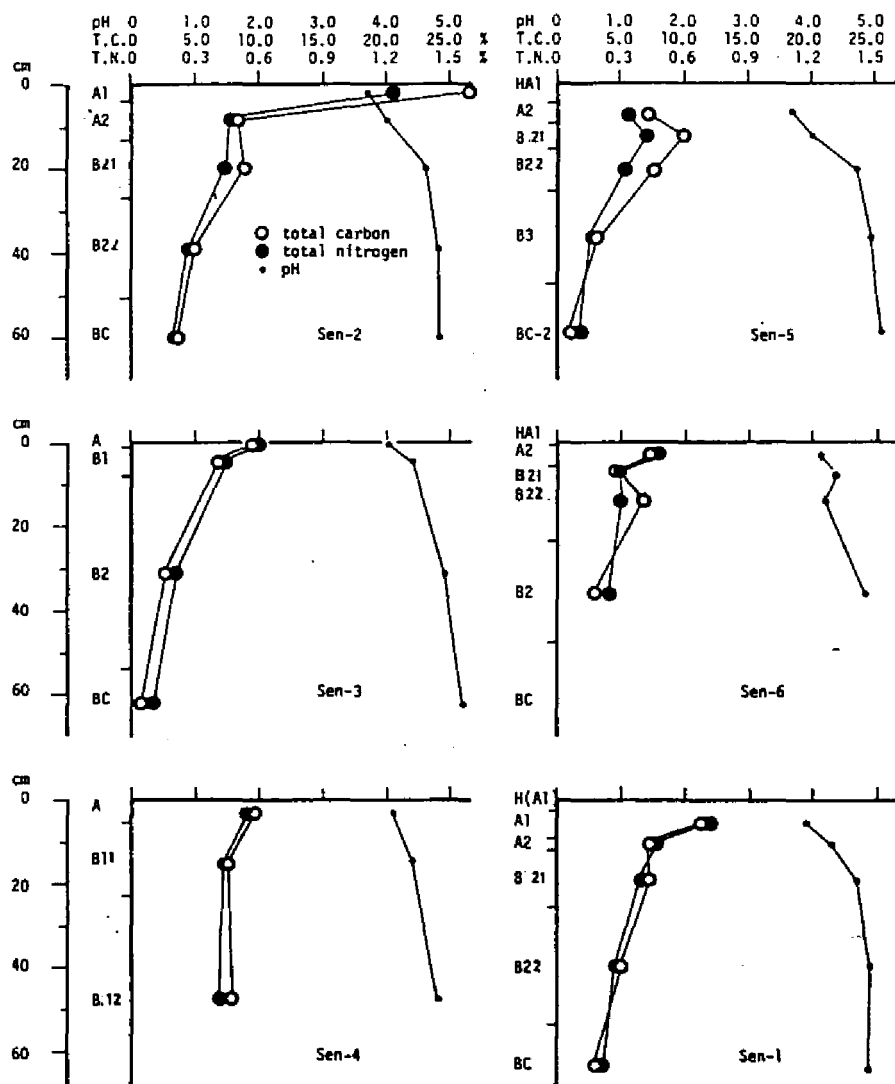


図 4-1-8 野呂川越地形カタナにおける微地形別の pH、全炭素、全窒素

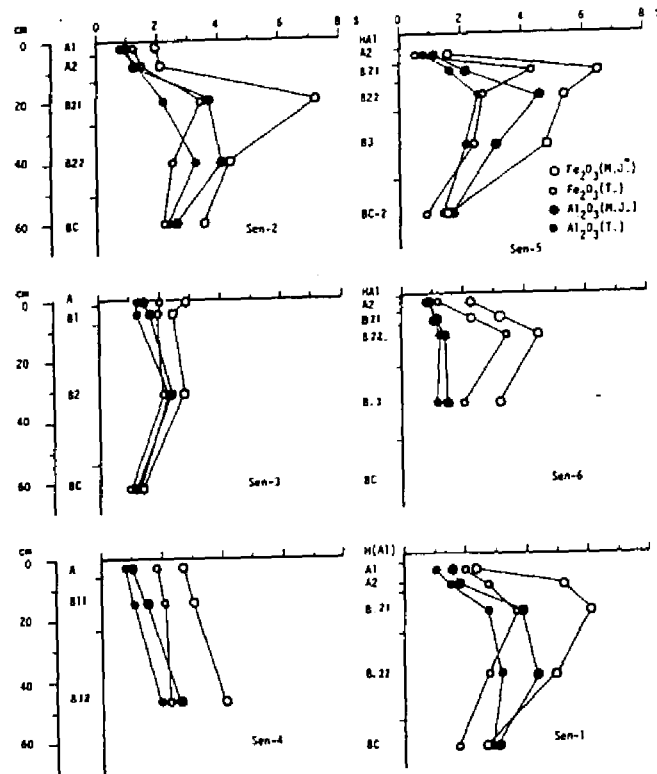


図 4 - 1 - 9 野呂川越地形カタナにおける微地形別の遊離酸化鉄、遊離酸化アルミニウム

4 - 1 - 5、図 4 - 1 - 8)。また同じ微地形で鉄、アルミニウムの溶脱・集積に伴い土壤有機物も同調して A_2 層から B_2 層へ移動・集積する傾向を示した (図 4 - 1 - 9)。このような溶脱と集積は残積斜面、浸潤斜面で強く、急傾斜の匍行斜面では溶脱を受けた鉄、アルミニウムは土壤下部へ移動するのではなく、斜面下方へ移動するものと推測された。崩積斜面の暗色系褐色森林土はまったく違った傾向を示した。

粘土鉱物組成でみた乾性ポドゾルは Al-Vermiculite で代表される層間アルミニウム鉱物が A 層に無く、Gibbsite が B 層に顕著に認められた (表 4 - 1 - 6)。暗色系褐色森林土ではこの傾向は認めらず、表層に Zeolite、全層に Chlomite が顕著に認められた。

微地形との関係では層間アルミニウム鉱物は残積斜面、浸潤斜面の A 層に認めらず、匍行斜面、崩積斜面の A 層に認められた。Lepidocrocite が残積斜面では P_{DI} 型土壤の BC 層に、匍行斜面では P_{DIII} 型土壤の A と B 層に、崩積斜面では $d B_0$ 型土壤の A 層に、浸潤斜面では P_{DI} 型土壤の A と B 層に、そして運積斜面では P_{DII} 型土壤の B 層に認められた。

Lepidocrocite は還元状態の土壤に存在するとされる (Iwasa 1965)。松井 (1981) によれば Lepidocrocite は湿性ポドゾルで認められるが、乾性ポドゾルでは認められないと述べている。本研究では野呂川越地形カタナ上の $P_{DI} \sim P_{DIII}$ と $d B_0$ にその存在が認められ、乾性ポドゾルにも存在することが解った。融雪や梅雨などにより、調査地の土壤は一時的に還元状態を呈するときがあると考えられる。気候条件や地形カタナ上での分布から、乾性ポドゾルは湿潤気候下の地形的乾燥状態に認められると推定される。地形カタナ上で微地形別に各層位に認められた Lepidocrocite は、その層位が一時的にも還元状態にあることを表わし、斜面上部から BC 層 - A・B 層 - A 層 - A・B 層 - B 層と認められ、還元状態をもたらす土壤中で浸透、滞水、横移動などの水の動態を表わしていると考えられる。

表4-1-6 野呂川越地形カタナにおける微地形別の粘土鉱物組成

PLOT	層位	Verm	Inter	Mica	Chlo	Kao	Gibb	Lep	Zeo	Geo	Others
仙-1	A1	+*2	+++	++	-	+	-	-	-	-	-
	A2	(++)*3	(++)	++	-	+	-	-	-	-	-
	B21	(+++)	(++)	-	-	++	+++	-	-	-	-
	B22	(+++)	(+)	+	-	+	++	-	-	-	-
	BC	(++)	-	+	±	++	+	-	-	-	-
仙-2	A21	+++	+++	++	-	+	-	-	-	-	-
	A22	-	+++	+++	-	++	-	-	-	-	-
	B21	(+++)	(++)	+	-	+	++	-	-	-	-
	B22	(+)	(++)	-	+	+	++	-	-	-	-
	BC	(+)	(+)	++	+	++	++	+	-	-	-
仙-3	A	(++)	(+++)	++	-	++	-	+	-	+	-
	B2	(++)	(++)	++	+	++	-	-	-	-	-
	B3	(++)	(++)	++	±	++	-	+	-	-	-
	BC	(++)	-	+++	±	+++	-	+	-	-	-
仙-4	A	(+)	(+++)	+++	++	+++	-	+	++	-	-
	B11	(+)	(++)	++	+	++	-	-	-	-	-
	B12	(+)	(++)	+	+	++	+++	-	-	-	-
仙-5	A2	-	+++	+++	-	++	-	+	-	-	-
	B21	(+)	+++	++	-	++	-	+	-	-	-
	B22	(+++)	(+)	+	-	+	++	-	-	-	-
	B3	(+++)	-	-	-	+	++	-	-	-	-
	BC11	(+)	-	+++	±	++	-	-	-	-	-
	BC12	(++)	(++)	+	-	++	++	-	-	-	-
仙-6	A2	+	+++	+++	-	++	-	-	-	-	++
	B21	(±)	+++	++	±	++	-	++	-	-	++
	B22	(±)	+++	+++	±	++	-	+	-	-	++
	B3	(+++)	(+)	++	±	++	++	-	-	-	+

*1 Verm : Vermiculite, Inter : Interstratified(Mica + Vermiculite),
Chlo : Chlomite, Kao : Kaolin, Gibb : Gibbsite, Lep : Lepidocrocite,
Zeo : Zeolite, Goe : Goethite, Others : 3.4 Å minerals

*2 (++) : 層間アルミニウム鉱物

*3 - : 無視量, ± : 同定可能, + : 弱強度 (相対強度は3から9), ++ : 中強度
(相対強度は10から30), +++ : 強強度 : (相対強度は30以上)

第3項 湿性ポドゾル

木曾谷一帯は気候条件、地質条件から湿性ポドゾルが広く分布する。この土壌の生成に水の果たす役割は大きく、また水の動きは微地形に依存する。このことから本項では湿性ポドゾルの分布パターン、土壌の諸性質と微地形との関係を三浦実験林において検討した。土壌の断面形態から湿性鉄型ポドゾルを中心に6つの土壌型が認められた。土壌型と微地形の関係は、

乾性弱ポドゾル化土壌 (P_{DIII}型) — 残積斜面

P_{DIII}型土壌～湿性鉄型弱ポドゾル化土壌 (P_{w(III)}型)

— 浸潤斜面

湿性鉄型ポドゾル化土壌 (P_{w(II)}型) ～ P_{w(III)}型土壌

— 匍行斜面

P_{w(II)}型土壌

— 運積斜面(1)

湿性鉄型ポドゾル (P_{w(I)}型)

— 運積斜面(2)

$P_{w(III)}$ 型土壤～未熟土 (I m)
 $P_{w(III)}$ 型土壤～グライ土壤 (G) ～未熟土
 $P_{w(II)}$ 型土壤
 グライ土壤 (G) ～ $P_{w(II)}$ 型土壤

— 崩積斜面 (1)
 — 崩積斜面 (2)
 — 匍行斜面 (2)
 — 沖積斜面

と対応関係が認められた (図 4-1-10)。

典型的な湿性鉄型ポドゾルは運積斜面 (2) に分布した。運積斜面 (2) は凹型面を呈し、運積斜面 (1) は微凸型面を示す。この運積斜面 (2) を中心に上下方に湿性ポドゾル化は弱くなり、 $P_{w(III)}$ 型土壤や $P_{w(II)}$ 型土壤に移行した。未熟土は 1959 年の伊勢湾台風と 1961 年の第 2 室戸台風により天然ヒノキの風倒が生じ根倒れた跡地—運積斜面と崩積斜面であった (図 4-1-11)。発達した湿性鉄型ポドゾルは鉄磐層を B 層上部に形成し、より深い土層への樹木の根の伸長を妨げるためここでの立木は根倒れ易いと考えられる。そのため湿性鉄型ポドゾルがよく発達する運積斜面と崩積斜面に主に根倒れ跡が認められると推定した。

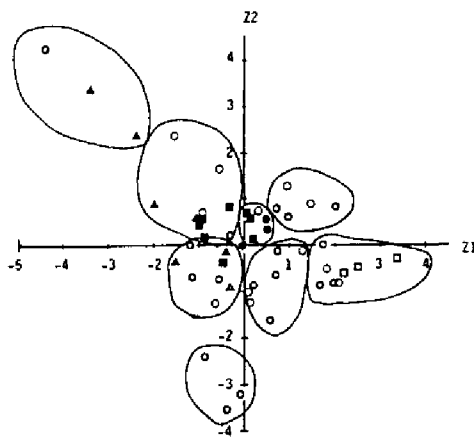


図 4-1-10 三浦実験林での湿性鉄型ポドゾルを主とする土壤型と微地形の対応関係—微地形特性値による主成分分析のスコア—散布図への土壤型の図示

(●: $P_{w(II)}$, ○: $P_{w(III)}$, ○: $P_{w(III)}$, ■: I m, ▲: B_D, □: $P_{D(III)}$, ▲: G)

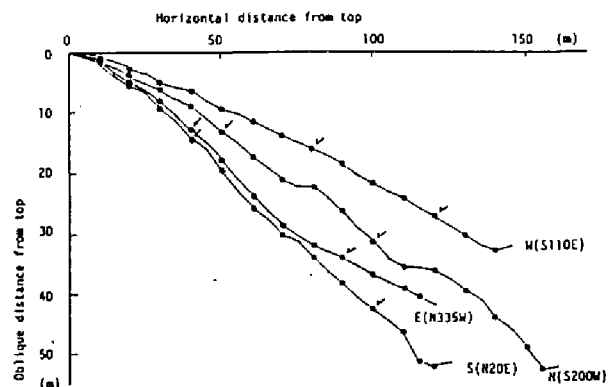


図 4-1-11 三浦実験林における 4 地形カテナ上で認められた未熟土の位置 (○)。運積斜面と崩積斜面にあたる。

土壤の特性値を用いた主成分分析の結果は、第 3 主成分の固有値が 3.1、累積寄与率が 67.9% とこれらの主成分は総合特性値と考えられる (図 4-1-12)。第 1 主成分は正に全炭素、全窒素、塩基置換容量を、負に pH、容積重、固相などを表わし、化学性と物理性を表現した。第 2 主成分は負に A 層、A₂ 層の厚さ、細孔隙、最大容水量を表わし、断面形態と物理性を表現していた。第 1、第 2 主成分とも正の象限に $P_{D(III)}$ 型、B_D 型土壤が分布し、第 1 主成分が正で、第 2 主成分が負の象限には $P_{w(II)}$ 型土壤が運積斜面に対応して、主に分布した。第 1、第 2 主成分とも負の象限にはグライがかかった土壤が位置した。未熟土は第 1 主成分が負で、第 2 主成分が正の象限に分布し、運積斜面 (2) と崩積斜面に対応していた。 $P_{D(III)}$ 型土壤、B_D 型土壤は粗孔隙が多く透水性も良かった。 $P_{w(II)}$ 型土壤では細孔隙が多く透水性は悪かった。グライがかかった土壤は固相部分が多く、未熟土では容積重が高い傾向を示した。土壤特性値を用いた主成分分析により土壤型が区分され、これら土壤型は微地形と対応した。

微地形別の土壤諸特性では (表 4-1-7)、A 層は地形カテナ下部の匍行斜面 (2) と沖積斜面で非常に厚かった。湿性鉄型ポドゾルが分布する運積斜面 (2) では容積重が高く、粗孔隙が少な

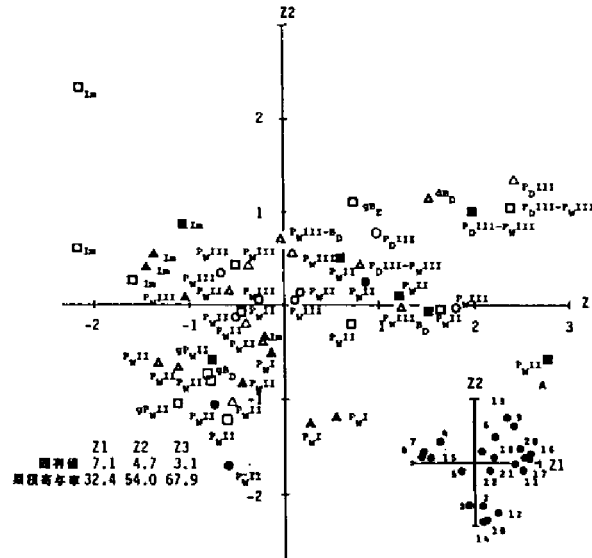


図 4-1-12 三浦実験林での乾性ポドゾルを主とする土壌の特性値を用いた主成分分析の第 1 主成分と第 2 主成分のスコア散布図。記号は微地形単位を表わす。A は第 1 主成分と第 2 主成分への因子負荷量の散布図。数字は表 4-1-7 に従う。

(○：残積斜面、△：浸潤斜面、○：匍行斜面(1)、●：匍行斜面(2)、▲：運積斜面(1)、▲：運積斜面(2)、□：崩積斜面(1)、■：崩積斜面(2)、□：沖積斜面)

表 4-1-7 三浦実験林における湿性鉄型ポドゾルを主とした土壌特性値

土壌特性値	微地形単位									
	残積斜面	浸潤斜面	匍行斜面(1)	匍行斜面(2)	運積斜面(1)	運積斜面(2)	崩積斜面(1)	崩積斜面(2)	沖積斜面	沖積斜面
1 A ₀ 層厚**	3.8	6.1	7.6	4.1	4.5	4.9	5.9	6.8	2.5	2.5
2 A ₁ 層厚	7.0	13.1	18.0	15.0	20.6	10.3	13.2	33.8	31.0	31.0
3 A ₂ 層厚	0	6.8	7.3	6.1	11.2	4.2	5.3	16.8	21.8	21.8
4 腐葉量	7.9	20.7	2.2	1.8	9.6	28.6	3.7	2.5	36.3	36.3
5 腐葉量	4.9	6.5	3.8	7.2	6.2	4.2	5.9	11.3	3.6	3.6
6 透水性	412	599	749	363	271	443	390	221	226	226
7 容積重量	36.5	33.7	30.9	35.4	45.0	50.4	31.7	19.6	59.4	59.4
8 固相	19.6	19.7	16.2	19.1	22.6	24.5	17.4	16.1	28.5	28.5
9 粗孔隙	45.0	34.7	39.3	40.4	33.0	37.0	40.3	40.3	28.3	28.3
10 細孔隙	35.4	45.5	44.5	40.5	44.4	38.5	42.4	43.6	43.2	43.2
11 全孔隙	80.4	80.3	83.8	80.9	77.4	75.6	82.6	83.9	71.5	71.5
12 最大容水量	61.3	65.4	68.2	63.8	66.2	61.6	67.5	70.4	66.4	66.4
13 最小容水量	19.1	14.9	15.6	17.2	11.2	13.9	15.2	13.5	5.1	5.1
14 採取水分量	46.9	56.7	57.0	52.0	57.4	50.5	55.2	59.4	57.6	57.6
15 pH	3.74	3.97	3.98	3.86	3.94	3.91	3.70	3.87	4.06	4.06
16 全炭素	19.19	11.73	8.21	10.52	7.57	10.51	16.90	7.50	7.13	7.13
17 全窒素	0.84	0.57	0.40	0.59	0.43	0.58	0.89	0.46	0.46	0.46
18 C/N	22.8	21.5	20.6	17.0	17.6	17.6	18.6	17.1	15.7	15.7
19 C.E.C.	42.9	29.4	22.4	29.1	22.5	29.3	39.7	22.6	22.1	22.1
20 ex-Ca	4.86	3.22	1.74	1.36	1.14	1.90	3.27	0.87	1.66	1.66
21 ex-K	0.57	0.43	0.33	0.32	0.31	0.38	0.68	0.23	0.28	0.28
22 ex-Mg	0.66	0.60	0.36	0.38	0.30	0.47	0.63	0.23	2.34	2.34
23 B.C/A.C*	0.31	0.36	0.57	0.38	0.36	1.19	0.41	0.52	0.42	0.42
24 B層全炭素	6.14	3.52	3.25	3.68	2.40	4.98	3.16	2.46	3.02	3.02
25 B層全窒素	0.25	0.17	0.15	0.19	0.13	0.30	0.20	0.14	0.17	0.17
26 B層 C/N	24.6	20.1	22.8	19.5	19.2	16.4	15.9	17.6	18.8	18.8
No. of Plots	1	5	6	8	8	10	7	3	3	3

* (B 層の全炭素) / (A 層の全炭素)

** 単位: 1(cm), 2(cm), 3(cm), 4(g/400cc), 5(g/400cc), 6(cc/min.), 8(X), 9(X), 10(X), 11(X), 12(X), 13(X), 14(X), 15(X), 17(X), 19(mg/100g), 20(mg/100g), 21(mg/100g), 22(mg/100g), 24(X), 25(X)

く、細孔隙が多かった。湿性鉄型ポドゾルに果たす土壌の物理性は透水性が悪く、水分保持が強い特徴がうかがえた。土壌化学性では全体に pH は低かった。全炭素・全窒素と C/N 比は残積斜面で高く、沖積斜面で低かった。乾性ポドゾルや褐色森林土と相違する特徴は置換性カルシウ

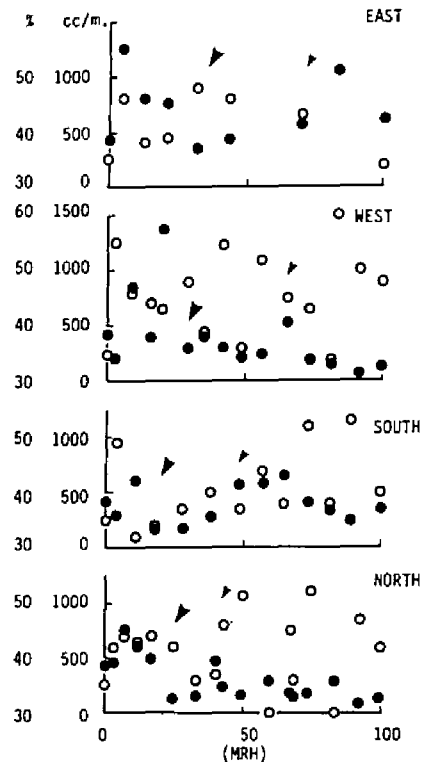


図 4-1-13 三浦実験林における
4 地形カテナの相対高 (MRH) と
透水性 (●)、細孔隙 (○) との関係 (▲：
運積斜面、▴：崩積斜面)

ムが残積斜面から匍行斜面(2)、沖積斜面と下部の微地形に対し次第に減少している点であった。

この様に土壤の物理的性質が湿性鉄型ポドゾル及ぼす影響は強い。そこで透水性と細孔隙を地形カテナ上の相対高 (MRH) で検討してみる。方位によって微地形の出現序列は相違するが透水性は 4 つの地形カテナにおいて必ず運積斜面で減少する傾向を示した(図 4-1-13)。これに続く崩積斜面では増加していた。一方、細孔隙はほぼこれと逆の傾向を示し、透水性の悪いところでは土壤の含水率が高かった。この傾向が運積斜面を中心に認められ、ここでの湿性鉄型ポドゾルの発達が最も著しいことと対応していた。

第 4 項 未熟土壤

上高地の土壤は乾性ポドゾルがその主体をなしている。一方、未熟土の分布も広く、この地域の土壤景観を特徴付けている。この地域では 12 の土壤型が認められたが、主な土壤型と微地形の関係は、

乾性ポドゾル (P_{DI} 型)

—— 浸潤斜面

P_{DI} 型土壤

—— 匍行斜面

湿性腐植型、鉄型ポドゾル化土壤 ($P_{W(h)II}$ 、 $P_{W(h)III}$ 型)

～未熟土 (I_m 型) ～乾性弱ポドゾル化土壤 (P_{DIII} 型)

—— 運積斜面

暗色系褐色森林土 (d_B)

—— 崩積斜面(1)

未熟土 (I_m 型)

—— 崩積斜面(2)

I_m 型土壤～ d_B 型土壤

—— 沖積斜面

分析した土壌の特性値を用いて主成分分析を行うと土壌型毎に性質はまとまっていた（図4-1-15）。第3主成分の固有値は4.42で、累積寄与率は60.0%と、これらは総合特性値と考えられる。第1主成分は正に容積重、固相、礫を表わし、負に細孔隙、最大容水量を表わし、物理性を主に表現した。第2主成分は正にA₀層、溶脱層、集積層、C/N比を表わし、負にpH、置換性カルシウムを表わし、断面形態と化学性を表現した。スコアー散布図には第2主成分が正の値を示す2つの象限に乾性ポドゾルが分布した。第1主成分と第2主成分がともに負の値を示す象限には湿性ポドゾルと暗色系褐色森林土が分布し、第1主成分が正で第2主成分が負の値を示す象限には未熟土が分布した。乾性ポドゾルはA₀層、溶脱層、集積層とも顕著に厚く、C/N比が高かった。湿性腐植型ポドゾルは細孔隙が多く、全炭素・全窒素も多かった。暗色系褐色森林土は湿性腐植型ポドゾルに近い性質を持っていた。未熟土は礫含量が多く、容積重も高かった。

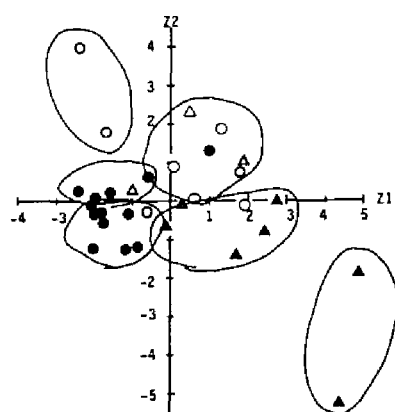


図4-1-14 上高地での未熟土を主とする土壤型と微地形の対応関係—微地形特性値による主成分分析のスコア散布図への土壤型の図示
(●: I m、▲: P_{DI}、△: P_{DII}、△: P_{DIII}、○: P_{w(h)II}、○: d B_D)

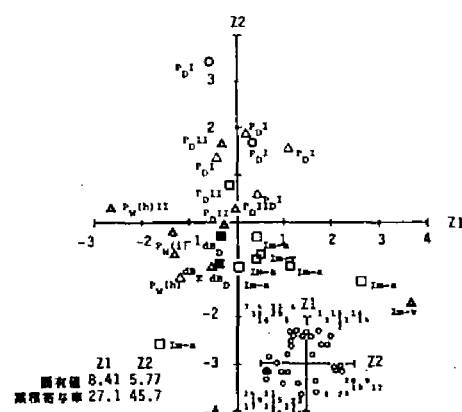


図4-1-15 上高地での未熟土を主とする土壌の特性値を用いた主成分分析の第1主成分と第2主成分のスコア散布図。記号は微地形単位を表わす。Aは第1主成分と第2主成分への因子負荷量の散布図。数字は表4-1-8に従う。(△：浸潤斜面、○：匍行斜面、△：運積斜面、□：崩積斜面(1)、■：崩積斜面(2)、□：沖積斜面)

— 49 —

表 4-1-8 上高地における微地形別の未熟土
壤を主とした土壌特性値

土壌 特性値	微地形単位					
	沖積 斜面	堆積 斜面	崩積 斜面	崩積 斜面(1)	崩積 斜面(2)	沖積 斜面
1 Ae層厚	7.4	8.5	4.7	5.2	5.1	3.1 cm
2 L	1.6	1.8	1.7	1.7	2.3	1.6 cm
3 F	2.7	3.5	1.9	3.4	2.8	1.5 cm
4 H	3.2	3.3	1.2	0.2	0	0 cm
5 A	17.3	17.3	11.2	7.0	7	10.8 cm
6 A2	10.1	17.3	5.2	0	3.1	0 cm
7 B2	16.1	31.0	13.0	0	3.5	0 cm
8 土壌硬度	1.2	0.3	2.0	0.8	1.0	0.70
9 腐	19.3	53.0	50.6	1.0	33.7	71.5 g/400cc
10 腐	8.0	13.1	4.6	3.2	5.6	5.8 g/400cc
11 透水性	178	449	129	108	257	236 cc/min.
12 容積重	45.1	50.3	44.7	54.0	53.6	48.3
13 固相	24.1	30.3	24.8	23.8	26.5	27.1 %
14 飽和度	38.6	47.2	33.6	40.9	45.1	41.8 %
15 飽和度	37.3	22.6	41.6	35.4	28.4	31.1 %
16 全孔隙	75.9	69.8	75.2	76.2	73.5	72.9 %
17 最大容水量	62.0	47.2	63.8	68.2	57.0	59.7 %
18 最大容水量	13.9	22.6	11.4	8.1	16.5	13.2 %
19 採取時水分量	47.5	32.1	50.4	57.5	38.3	39.4 %
20 PI	423	3.89	4.16	4.46	4.52	5.45
21 全炭素	6.53	16.79	12.13	12.82	7.98	6.90 %
22 全窒素	0.40	0.57	0.69	0.70	0.48	0.52 %
23 C/N	16.8	28.7	17.1	18.6	17.4	11.4
24 C.E.C	22.5	34.4	35.2	36.0	22.8	21.3 me/100g
25 ex/Ca	0.39	0.83	0.74	3.06	2.91	11.14 me/100g
26 ex/K	0.28	0.62	0.65	0.35	0.55	0.73 me/100g
27 ex/Mg	0.31	0.53	0.53	0.68	0.69	0.94 me/100g
28 B.C/A.C	1.13	1.17	1.86	0.42	0.31	0.57
29 (B)T.C.*	5.54	13.02	5.73	5.32	1.86	0.96 %
30 (B)T.N.*	0.25	0.58	0.30	0.30	0.11	0.09 %
31 (B)C/N*	22.4	22.0	19.1	17.9	16.1	9.8
No. of Plots	5	2	9	2	4	6

*:B 層の炭素、窒素と C/N 比

未熟土を母材と移動・堆積の違いで岩屑性未熟土 (I m-r)、火山性未熟土 (I m-v)、沖積性未熟土 (I m-a) に区分すると、岩屑性未熟土は運積斜面に分布し、火山性未熟土は運積斜面と崩積斜面に分布し、沖積性未熟土は沖積斜面に分布していた。各未熟土を乾性ポドゾルや湿性腐植型ポドゾル化土壌と塩基置換容量、置換性塩基量、腐植酸について比較すると、湿性腐植型ポドゾル化土壌は未熟土に対して塩基置換容量が顕著に高かった。岩屑性未熟土は塩基置換容量、置換性塩基類とも極端に低かった。火山性未熟土は土壌層位によって塩基置換容量と置換性塩基量に変化した。沖積性未熟土は置換性塩基量が高く、特に置換性カルシウムが顕著に高かった。P. 26 (横尾山荘上) < P. 21 (横尾山荘下) < P. 22 (明神池) と梓川の下流に行くに従いこの傾向は顕著になった(図 4-1-16)。熊田(1977)の腐植酸の分類図を用いて土壌中の腐植物質をみると A 型腐植酸、B 型腐植酸は認められず、R P 型腐植酸と P 型腐植酸が認められた(図 4-1-17)。R P 型腐植酸は未熟で腐植化の初期段階に位置するとされる(熊田 1977)。A 層から下層 (B、C 層) への腐植酸の型の変化をみると、崩積斜面の火山性未熟土と沖積斜面の沖積性未熟土の一部では R P 型→R P 型であった。運積斜面の岩屑性未熟土と火山性未熟土は P 型→P 型であった。湿性腐植型ポドゾルと暗色系褐色森林土もこのパターンに含まれた。R P 型→P 型の変化は沖積斜面にある沖積性未熟土に見られた。P 型→R P 型の変化は乾性ポドゾルに見られた。

未熟土の分布が運積斜面、崩積斜面、沖積斜面に認められた。これは不安定な匍行斜面あるいは運積斜面から運ばれた表層物質が堆積し、時間的経過が短く未熟土となっているか、斜面上部あるいは上部谷から絶えず新しい表層物質の供給を受けて未熟土になっていると考えられる。もし移動堆積する表層物質の腐植酸の形態が R P 型とすると、絶えず上部から表層物質の供給を受けている崩積斜面の火山性未熟土や沖積斜面の沖積性未熟土は表層から C 層まで R P 型腐植酸が分布すると考えられる (R P→R P)。沖積性未熟土の中には表層が R P 型腐植酸で C 層が P 型腐

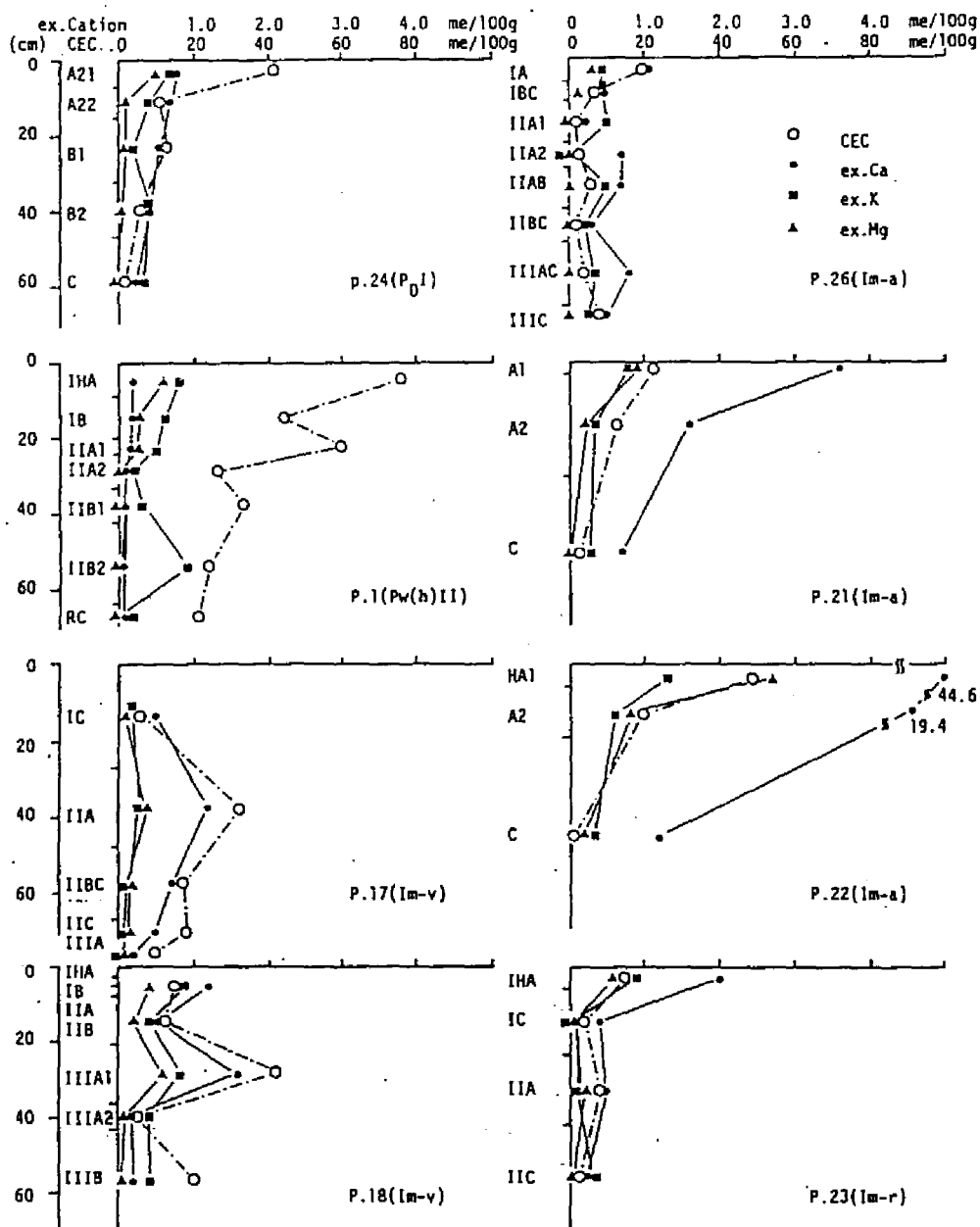


図4-1-16 上高地における相違する未熟土、乾性ポドゾル、湿性腐植型ポドゾル化土壌の塩基置換容量と置換性塩基類

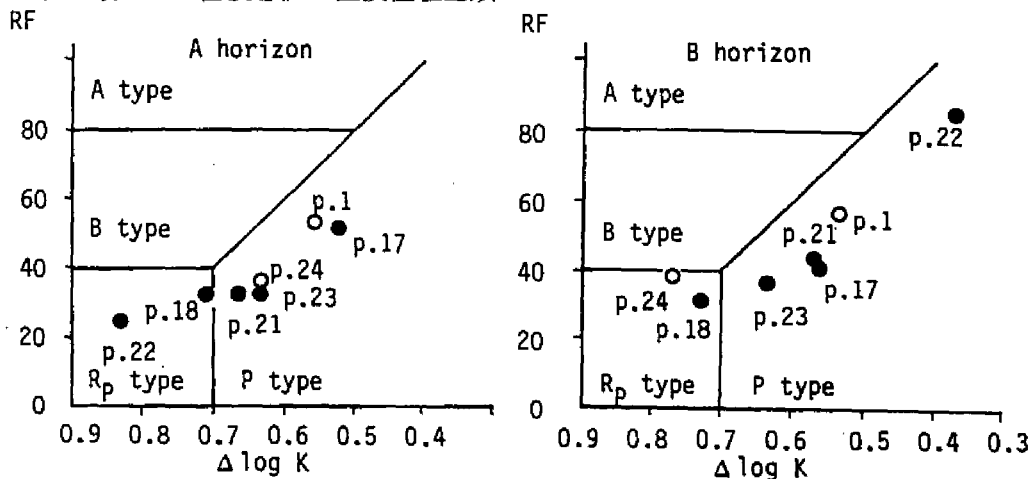


図4-1-17 上高地における未熟土壌を主とするA層とB、C層の腐植酸の分類 (プロット番号は図4-1-16に従う)

植酸をしめすものがあり、C層が比較的長時間経過したと考えられる。沖積斜面における表層物質の移動、堆積は場所により相違する。一方、運積斜面の岩屑性未熟土や火山性未熟土はA層とC層がP型腐植酸を示し、運積斜面の表層物質が下部に運ばれているとしても、ここでの腐植物質は比較的腐植化の進んだ段階を経ていると考えられる。腐植物質の腐植化は有機物の供給、土壌の水湿、地温などの因子と関係していると考えられ、単に表層物質の移動、堆積と時間的経過だけで結論はだせない。しかし未熟土における表層からC層への腐植酸の形態の変化は微地形に対応する表層物質の移動、堆積と時間的経過に関係していると推測される。

第2節 森林植生、天然更新状態、造林木の成長と微地形との関係

第1項 亜高山針葉樹林、スギ天然林の森林構造、林床植生と天然更新

1. 1 亜高山針葉樹林

天然林を対象に森林の種組成、構造と微地形との関係を亜高山針葉樹林で検討してみた。調査は赤石山脈の81地点と上高地の31地点で行い、各森林型と微地形の対応関係を検討した(図4-2-1、図4-2-2)。明瞭な森林型と微地形の対応では、ハイマツ林が残積斜面～浸潤斜面に分布し、赤石山脈ではカラマツ林が崩積斜面～沖積斜面に分布し、上高地ではケショウヤナギ林が沖積斜面に分布していた。赤石山脈のコメツガ林は標高2200m以下で広い範囲に分布するが、それ以上の標高になると凸型の残積斜面、匍行斜面に分布する傾向があった。一方、アオモリトドマツ、シラベ林は広い範囲に分布しているため微地形との関係は明かではなかった。

カラマツ林が崩積斜面と沖積斜面に分布する要因として、これらの微地形は絶えず新しい表層物質の供給を受けやすく、堆積物の時間経過が短い時、それは未熟土となっており、このような場所に先駆種的な性格をもつカラマツ林は成立しやすいと考えられる。一方、崩積斜面や沖積斜面に成熟土壌が分布する場合、そこにはアオモリトドマツ、シラベ林が成立していた。表層物質が安定し、長期の時間経過を経た場合、崩積斜面や沖積斜面の未熟土は成熟土となり、カラマツは遷移し、アオモリトドマツやシラベなどの極盛相を構成する種に変化すると考えられる。同じ先

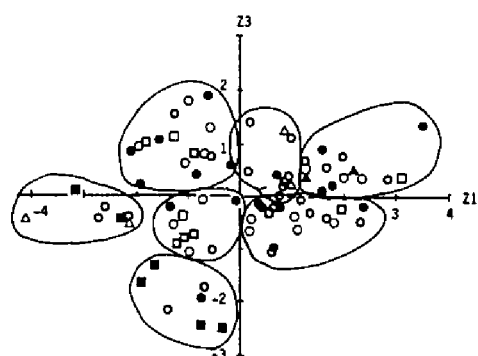


図4-2-1 赤石山脈における森林型と微地形の対応関係

—微地形特性値による主成分分析のスコア—
散布図への森林型の図示

(○：アオモリトドマツ、○：シラベ、●：コメツガ、□：トウヒ、□：ダケカンバ、■：カラマツ、▲：ハイマツ、△：その他)

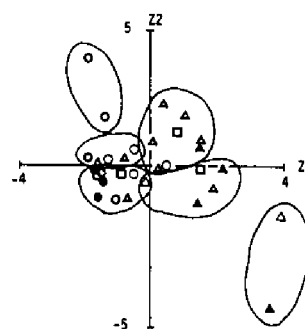


図4-2-2 上高地における森林型と微地形の対応関係—微地形特性値による主成分分析のスコア—散布図への森林型の図示

(□：草本、△：ハイマツ、△：アオモリトドマツ、▲：コメツガ、○：ダケカンバ、●：ケショウヤナギ、○：その他)

駆種であるケショウヤナギ林は絶えず上部谷から物質の供給を受ける沖積斜面に成立すると考えられる。

林床の群落について、前田・宮川(1970)の林床型の概念を用いて微地形との関係を検討してみた。この林床型は種組成表を基に指標種を抽出し区分する方法で、赤石山脈では7つの林床型(Kobayashi et al. 1987)が、上高地では5つの林床型(小林ら 1984)が認められた。2つの調査地では組成種が異なるが、ツツジ型、コケ型、カニコウモリーシラネワラビ型、大型草本型は共通して見られた。赤石山脈ではこの地域固有のセリバシオガマ型が特異で、ササ型は概して標高の低い場所に限られていた。上高地ではササ型(アズマネザサ、チマキザサ)は比較的広範囲に分布し、大型草本型にはカワラナデシコなど赤石山脈の組成種とは異なった種で構成されている場合が多かった。RhododendronやVacciniumで構成されるツツジ型は残積斜面を中心に浸潤斜面と匍行斜面に分布した(図4-2-3、図4-2-4)。コケ型とササ型は分布範囲が広く、明瞭な傾向は認められないが運積斜面を中心に匍行斜面、浸潤斜面、または崩積斜面に分布した。シラネワラビ・カニコウモリ型は運積斜面に、大型草本型は沖積斜面に分布した。赤石山脈ではセリバシオガマ型は広く分布するが凸型斜面に限られていた。

森林型の分布はいくつかのものを除いて、微地形のスケールを越えているため対応関係がそれほど明かではなかったが、立木密度、樹高など群落特性で対応がみられた。林床群落はいくつかの林床型を除いて、その分布範囲が微地形(例えば100m²)の大きさにに対応するため、林床型と微地形の結び付きは強いものと判断された。

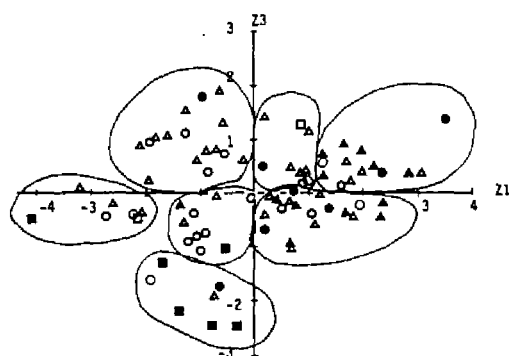


図4-2-3 赤石山脈における林床型と微地形の対応関係—微地形特性値による主成分分析のスコア散布図への林床型の図示
(▲：ツツジ型、△：コケ型、●：セリバシオガマ型、○：シラネワラビ・カニコウモリ型、○：欠除型、■：大型草本型、□：チゴユリ型)

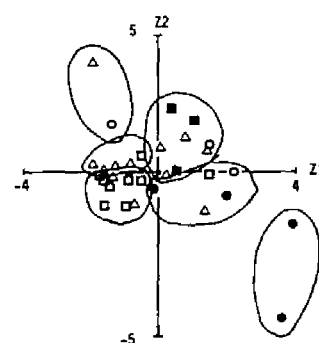


図4-2-4 上高地における林床型と微地形の対応関係—微地形特性値による主成分分析のスコア散布図への林床型の図示
(●：ツツジ型、○：コケ型、△：ササ型、□：(大型)草本型、■：シラネワラビ・カニコウモリ型)

森林を構造の面から検討してみると、微地形との関係が明瞭であった(表4-2-1、表4-2-2)。立木密度は浸潤斜面、匍行斜面で高く、運積斜面、崩積斜面で低かった。平均樹高と胸高直径は崩積斜面で大きい傾向を示した。沖積斜面では土壌の安定性と発達程度が関係して、立木密度や樹高、胸高直径に赤石山脈と上高地では相違した傾向を示した。沖積斜面に未熟土壌の分布が広く、土壌が不安定な上高地では立木密度が高く、平均樹高が低く、これは発達段階初期の森林が多いためと考えられた。一方、沖積斜面でも安定した土壌の場所では樹高や胸高直径が

表 4-2-1 赤石山脈における微地形別の森林と林床の群落特性

群落特性	微地形単位						
	残積斜面	匍行斜面	浸潤斜面	運積斜面(1)	崩積斜面	運積斜面(2)	沖積斜面
1 立木密度	32.1	45.2	43.7	28.2	37.3	32.4	28.8 /100m ²
2 胸高断面積	491.1	223.0	203.7	301.8	332.0	357.5	1027.8 cm ²
3 平均樹高	9.6	8.5	8.1	9.6	10.6	11.0	13.5 m
4 稚樹密度	899.3	814.2	756.3	619.4	187.1	877.4	331.0 /100m ²
5 胸(H<30cm)	770.9	750.2	685.7	503.5	168.1	804.7	284.0 /100m ²
6 胸(H>30cm)	128.4	64.0	70.6	115.9	19.0	72.7	55.3 /100m ²
7 平均稚樹高	18.5	19.0	20.3	20.5	9.6	19.5	33.3 cm
8 林床植生種数	13.7	14.1	13.6	12.8	14.6	12.9	14.0 /4m ²
9 林床平均多様度	1.847	2.009	1.687	1.577	1.404	1.826	1.867
10 林床全多様度	281.4	243.3	189.3	242.6	79.1	182.0	313.0
No. of Plots	12	10	18	16	7	10	7

表 4-2-2 上高地における微地形別の森林と林床の群落特性

群落特性	微地形						
	残積斜面	匍行斜面	浸潤斜面	運積斜面(1)	崩積斜面(2)	沖積斜面	
1 立木密度	24.4	12.4	23.0	11.1	12.0	26.4	/100m ²
2 平均樹高	4.4	11.9	6.8	13.9	14.6	9.6	m
3 平均胸高径	7.7	23.3	13.5	25.2	29.2	17.4	cm
4 最大樹高	7.2	17.5	11.0	27.2	28.0	14.4	m
5 最大胸高径	21.2	39.5	35.5	60.0	67.8	36.6	cm
6 稚樹密度	452.5	877.5	717.5	57.5	17.5	45.0	/100m ²
7 稚樹高	7.4	5.1	8.5	3.5	5.1	2.4	cm
8 林床植生種数	9.8	9.4	10.0	6.0	5.8	10.3	/4m ²
9 林床平均多様度	1.071	1.397	1.685	0.300	0.349	1.371	
10 林床全多様度	281.9	138.5	193.7	25.3	37.1	140.1	
No. of Plots	5	9	2	2	4	9	

大きく、赤石山脈の沖積斜面と同様に微地形の中で最も立木密度が低く、樹高と胸高直径は最も大きい値を示していた。

高木階を構成する優占種の更新状態をみると、アオモリトドマツ、シラベの稚樹は広範囲に分布し、コメツガの稚樹は匍行斜面を中心に凸型の微地形に分布していた。カラマツ、ダケカンバの稚樹は森林が破壊された場所に多く、その中でも崩積斜面、沖積斜面に認められた。トウヒの稚樹は倒木上に多く認められるが、沖積斜面の未熟土の砂質土壌にも認められた。また赤石山脈では残積斜面について匍行斜面、運積斜面で更新稚樹の密度は高く、上高地では運積斜面について匍行斜面で高かった。崩積斜面や沖積斜面では更新稚樹の密度は著しく低く更新状態は悪かった。

林床群落の多様性では、沖積斜面で出現種数が最も多く、平均多様度では匍行斜面が高い傾向を示した。全多様度では残積斜面と沖積斜面が最も高かった。

1. 2 スギ天然林

屋久島の標高 1000 m 周辺には天然のスギ林が広く分布している。白谷保存林、屋久杉ランド、下屋久営林署第 9 林班のスギ天然林にモミ、ツガが混成するが、ツガは残積斜面、匍行斜面に分布し、モミは浸潤斜面に成立することが多かった(図 4-2-5)。またミヤコダラは沖積斜面で、アカガシは匍行斜面でスギと混交していた。林床型は 4 型がここで認められた(小林ら 1981)。屋久島における林床型と微地形との対応関係は非常に強く、明瞭に認められた(図 4-2-6)。サクラツツジを主としたツツジ型は残積斜面、浸潤斜面に分布した。ヒメヒサカキアリドウシ型は匍行斜面に、ホウロクイチゴ型は運積斜面に、サツマイナモリーサンショウソウ型は沖

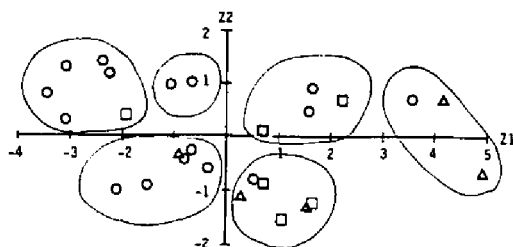


図 4-2-5 屋久島(白谷保存林、屋久杉ランド、下屋久営林署第 9 林班)における森林型と微地形の対応関係—微地形特性値による主成分分析のスコア—散布図への森林型の図示 (○: スギ、□: モミ、△: ツガ、◇: 広葉樹)

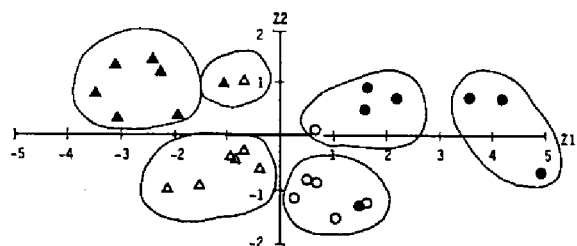


図 4-2-6 屋久島(白谷保存林、屋久杉ランド、下屋久営林署第 9 林班)における林床型と微地形の対応関係—微地形特性値による主成分分析のスコア—散布図への林床型の図示 (●: ツツジ型、○: ヒメヒサカキアリドウシ型、△: ホウロクイチゴ型、▲: サツマイナモリーサンショウソウ型)

造林木について検討した。残積斜面でのヒノキの樹高成長は悪く崩積斜面、沖積斜面で良くなる傾向は高原山と同様に認められるが、匍行斜面(1)で最も樹高は低く、匍行斜面(2)で最も高いという特徴的な傾向が見いだされた(表4-2-5)。造林木の樹高成長と微地形特性値との関係を見てみると、集水高とヒノキの樹高は、高原山と同様に緩やかな1次の相関を示した(図4-2-8)

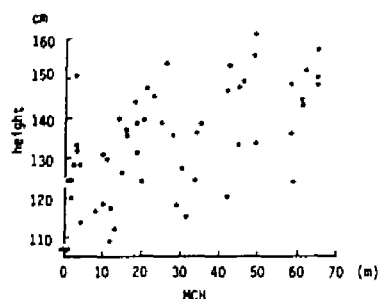


図4-2-8 高原山における集水高(MCH)とヒノキ造林木の成長との関係

表4-2-5 三浦実験林における微地形別のヒノキの樹高とササ高

微地形	残積斜面	浸潤斜面	匍行斜面(1)	遷移斜面(1)	遷移斜面(2)	崩積斜面(1)	崩積斜面(2)	匍行斜面(2)	沖積斜面
ヒノキ樹高 (cm)	187.0	209.2	172.0	198.4	213.0	215.9	215.2	272.7	218.5
ササ高 (cm)	110.0	173.0	160.0	148.3	154.4	155.0	145.8	140.0	110.0

9)。東西南北方向の地形カテナ別にこの点を見ると西向き斜面と北向き斜面では樹高成長に一定の傾向を示さず、東向き斜面と南向き斜面では強い1次の相関を示すことが解った。このことは地形カテナによって造林木の成長に違いがあること指している。また表面曲率(USC)と相対傾斜(URS)から造林木の樹高成長をみると相対傾斜が15°以上の場所では樹高と表面曲率の間に正の相関があり、15°以下ではこの関係は認められなかった(図4-2-10)。この様に微地形特性値の組合せにより造林木の成長が推定される。それ故に微地形特性値を総合化した微地形単位は造林木の成長を推定するのに有効な方法として使える場合がある。

第3節 森林伐採に伴う土壌の変化

第1項 ヒノキ、スギ人工林での伐採

森林の皆伐の繰り返しにより、スギやヒノキなどの造林木の成長量の減少や、スギの植栽が可能であった場所にヒノキしか植栽出来なくなるような適地の変化が起こっている(古賀 1959, 河原 1987)。これは森林環境の変化中でも森林土壌の変化によるものとされ幾つかの研究が報告されている。柴田ら(1951)は地況の似た有林地と伐採地、また伐採の経過年数の異なる林地で調査を行い、堤(1964)は伐採回数や伐採経過年数、地形の位置別に調査を行い、上田ら(1965)は土壌型や傾斜別に調査し、山谷(1965, 1966, 1977)は地形安定面上で土壌型別に伐採前から継続調査を

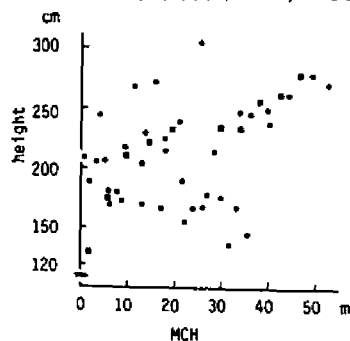


図4-2-9 三浦実験林における集水高(MCH)とヒノキ造林木の生長との関係(□:東向地形カテナ、○:南向地形カテナ、●:北、西向地形カテナ)

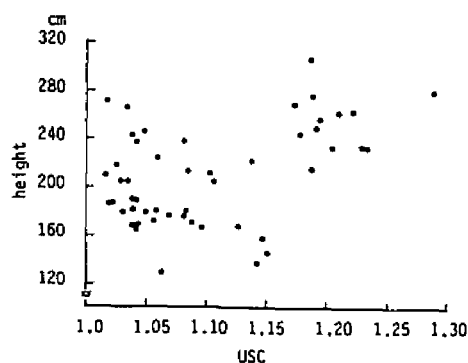


図4-2-10 三浦実験林における相対傾斜別表面曲率(USC)とヒノキ造林木の樹高との関係(●:相対傾斜15°未満、○:相対傾斜15°以上)

行っている。堤の伐採回数による土壌変化の研究や山谷の伐採前後の土壌変化の継続調査はこれら一連の研究の主要な点を解明しているものの森林は異なる土壌型を含み、同一土壌型であっても微地形は異なっている。それ故に皆伐による環境の攪乱やそれに伴う土壌諸特性の変化は一樣ではないと思われる。この項では同じ土壌型であっても微地形の異なるものを区分し、1地形カテナを施業対象地として、人工林の伐採に伴う土壌の変化を微地形毎に検討した。調査は栃木県高原山で行った。ここでは47年生のヒノキ・スギ人工林を1979年に皆伐し、架線集材後、巻落し地ごしらえを行い、ヒノキ・スギを植栽した後、毎年1回の下刈を行っている。土壌の調査は伐採前の1978年10月と伐採後の1979年10月に行い、続いて1980年、1983年と継続している。

1. 1 土壌の変化の機構

伐採により土壌に加わった直接的なインパクトは伐倒・搬出による地表攪乱、 A_0 層の供給源であったヒノキ林の搬出による落葉落枝の供給停止、地ごしらえによる過剰の枝葉の供給、または堆積有機物の奪取などがあげられる。このような直接的なインパクトの後に間接的なインパクトが加わる。間接的なインパクトは土壌環境-微気象の変化とこれに伴う土壌有機物の分解、植被を除去したための土壌構造破壊、雨滴侵食などである。これらの直接、間接のインパクトが土壌の変化をもたらせた(表4-3-1)。落葉落枝の供給が停止するため、 A_0 層は一部の巻落し地ごしらえの場所を除き減少した。 L 層はほぼなくなり、 F 層は一部増加し、 H 層の分解が促進された結果による。 A 層も減少の

表4-3-1 高原山におけるヒノキ、スギ林の伐採前後の土壌諸特性の変化

土壌特性	伐採前	伐採後(6ヶ月)	
1 L層	1.6 ± 0.8	0	cm
2 F層	1.4 ± 1.1	1.9 ± 2.0	cm
3 H層	0.7 ± 0.8	0.2 ± 0.5	cm
4 A_0 層	3.7 ± 1.9	2.1 ± 2.1	cm
5 A_1 層	6.4 ± 3.3	3.0 ± 4.4	cm
6 A_2 層	5.2 ± 2.2	2.9 ± 3.9	cm
7 全A層	11.2 ± 3.8	10.3 ± 5.4	cm
8 容積重	14.7 ± 15.7	9.8 ± 15.0	g/400cc
9 密度	2.0 ± 1.3	2.3 ± 1.4	g/400cc
10 pH	4.76 ± 0.35	4.65 ± 0.33	
11 置換酸度(Yi)	19.9 ± 10.7	16.8 ± 9.0	
12 C/N	20.6 ± 2.0	19.2 ± 2.4	
13 全炭素	15.41 ± 3.31	12.38 ± 2.96	%
14 全窒素	0.75 ± 0.14	0.65 ± 0.14	%
15 無機態窒素	2.03 ± 0.86	3.04 ± 2.52	mg/100g
16 塩基置換容量	47.2 ± 5.7	48.3 ± 6.5	me/100g
17 置換性-Ca	6.42 ± 5.47	3.41 ± 2.66	me/100g
18 置換性-Mg	1.46 ± 1.02	1.10 ± 0.69	me/100g
19 置換性-K	1.07 ± 0.32	0.83 ± 0.38	me/100g
20 NH_4-N	0.94 ± 0.57	1.60 ± 1.87	mg/100g
21 NO_3-N	1.10 ± 0.86	1.44 ± 1.64	mg/100g
22 透水性	446 ± 196	252 ± 129	cc/min.
23 容積重	37.9 ± 7.5	44.0 ± 8.1	%
24 採取時水分量	42.4 ± 3.9	47.6 ± 4.7	%
25 最大含水量	63.2 ± 3.6	67.6 ± 3.8	%
26 最小容気量	19.9 ± 4.6	12.6 ± 3.9	%
27 粗孔隙	47.7 ± 4.0	40.5 ± 4.8	%
28 細孔隙	35.4 ± 3.3	39.8 ± 4.0	%
29 全孔隙	83.0 ± 2.7	80.1 ± 3.0	%

傾向を示した。さらに土壌中の全炭素・全窒素が減少し、C/N比も低下し、無機態窒素は増加を示し、皆伐後急速に土壌有機物の分解が促された。土壌有機物の急速な分解はpHや置換酸度にも影響を及ぼし共に減少を示した。塩基置換容量はわずかに増加したが置換性塩基類は減少した。直接的なインパクトによる地表攪乱と土壌表層の裸地化、さらに土壌有機物の急速な分解の複合作用として、土壌の物理性は変化した。粗孔隙は減少し、細孔隙は増加した。粗孔隙の破壊された部分に鉱質土壌が充填される形で、容積重の増加がもたらされた。最大含水量は増加し、最小容気量は減少した。透水性の変化は顕著に現れ、極端な減少を示した。

土壌の物理性の変化は伐採による土壌の変化の中でも顕著な現象で、有機物の分解と雨滴攪乱に伴う土壌物理性の変化を実験的に確かめた。 B_0 型土壌のA層を400cc採土円筒を用いて採取し、この円筒試料を用いて実験を行なった。実験は(1)飽水状態、5°Cでインキュベーション、(2)飽水状態、25°Cでインキュベーション、(3)アカマツ林の林床に A_0 層を除去して放置、(4)裸地に放置の4条件で行なった。この状態で月1回、円筒表層の空隙率、採取時水分量、飽水時水分量、吸水板による脱水時水分量を測定した。実験条件の5°Cのインキュベーションは有機物の分解を押え、この実験でのコントロールとし、25°Cでは有機物の分解は促進さ

れる。野外の設定はアカマツ林の林床では植被があり、裸地では雨滴の直接の影響を受ける。実験の結果は、空隙率が野外で裸地>林床となり、室内で $25^{\circ}\text{C}>5^{\circ}\text{C}$ の順に早く大きく変化した(図4-3-1)。裸地では6カ月で30%もの空隙が生ずるに至った。森林が皆伐され土壌

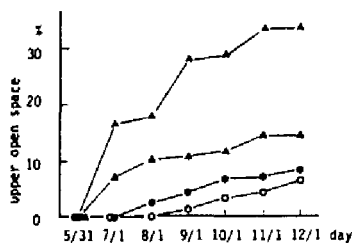


図4-3-1 褐色森林土採土円筒試料上部の空隙の変化
(○: 5°C 、●: 25°C 、△: アカマツ林下、▲: 裸地)

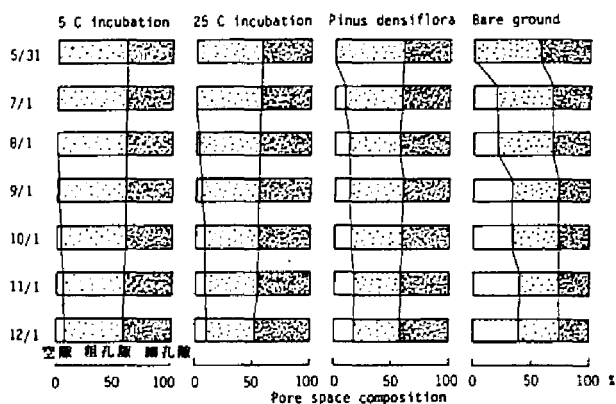


図4-3-2 褐色森林土円筒試料の気相組成(空隙、粗孔隙、細孔隙)の変化

が裸地化すると土壌有機物の分解と雨滴攪乱により土壌の沈降がもたらされることが明かとなった。孔隙に占める空隙率(円筒表層の空間)、粗孔隙率、細孔隙率も時間と共に変化した(図4-3-2)。コントロールの 5°C インキュベーションではほとんど変化せず、 25°C インキュベーションでは粗孔隙が減少し、細孔隙が増加していた。このことから土壌有機物の分解は粗孔隙を減少させ、細孔隙を増加させることが明かである。野外の林床では細孔隙はあまり変化しなかった。有機物の分解による細孔隙の増加は全孔隙の減少で相殺されていると考えられる。裸地では空隙の増加と粗孔隙、細孔隙の減少が認められた。土壌有機物の分解と雨滴攪乱が粗孔隙の破壊とさらには細孔隙まで減少させる変化をもたらすことが判明した。また最大容水量の減少は野外で裸地>林床となり、室内で $25^{\circ}\text{C}>5^{\circ}\text{C}$ の順に早く大きく変化した(図4-3-3)。これは上記の変化に伴う現象と考える。この実験で有機物の分解促進と雨滴攪乱が土壌の物理性に及ぼす影響を明らかにした。しかし、林地における土壌の物理性は土壌の移動や伐倒・搬出などの攪乱によっても変化すると考えられ、この実験では明かではない。

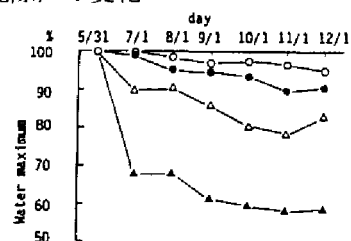


図4-3-3 褐色森林土採土円筒試料の最大容水量の変化
(供試土壌初期に対する割合、○: 5°C 、●: 25°C 、△: アカマツ林下、▲: 裸地)

1. 2 微地形に対応した伐採後の土壌の変化

伐採による土壌の変化は一様に生ずるのではない。そこで土壌断面形態、土壌化学性、土壌物理性について変化パターンを検討するため主成分分析を行い(図4-3-4)、第3章第1節で区分した微地形毎に土壌の変化率をまとめてみた(表4-3-2)。土壌断面形態の変化パターンは3つが認められた。その一つは浸潤斜面や沖積斜面でA層が厚くなる変化で、次に運積斜面や沖積斜面でA₀層が厚くなる変化が認められた。最も普遍的な変化はA₀層とA層が薄くなる現象で残積斜面、匍行斜面(1)(2)、崩積斜面に顕著に認められた。土壌化学性の変化は2つのパターンが認められた。残積斜面と匍行斜面に認められる全炭素・全窒素の減少と無機態窒素の増加の変化で、他の一つは崩積斜面と沖積斜面に認められる無機態窒素の減少のパターンであった。両者

の変化は共に置換性塩基類の減少を伴っていた。土壌物理性の変化は微地形により程度の差はあるが一様であった。容積重が増加し、粗孔隙が減少し、細孔隙が増加して透水性が減少した。これらの変化は微地形毎に作用因子が違い、主に残積斜面と匍行斜面では土壌有機物の分解に伴う

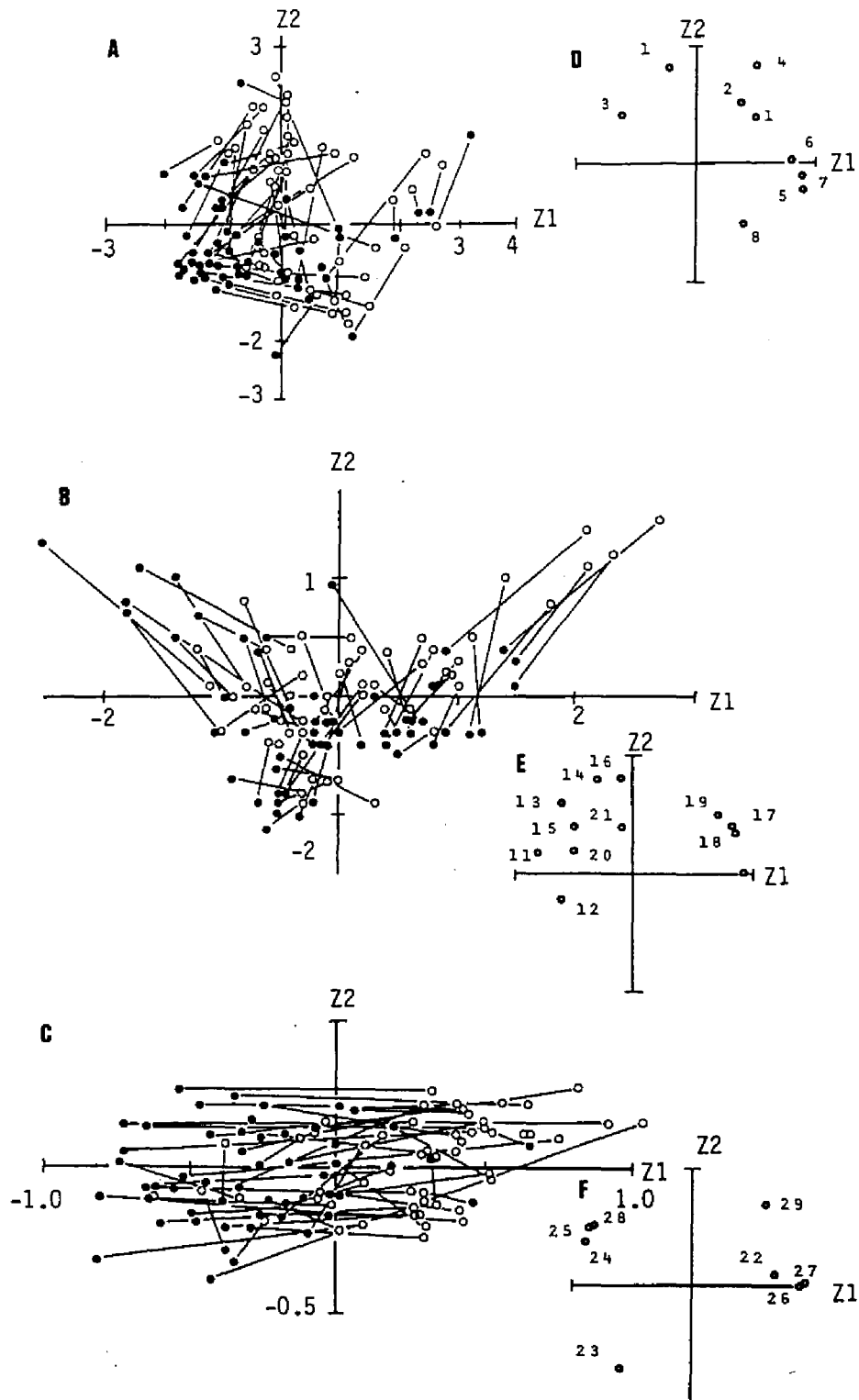


図4-3-4 高原山のヒノキ・スギ林の皆伐による土壌特性値の変化パターン。主成分分析による第1主成分と第2主成分のスコア散布図(A、B、C)と因子負荷量(D、E、F)ー(A、D：土壌断面形態、B、E：土壌化学性、C、F：土壌物理性) ○：伐採前、●：伐採後

変化が卓越し、運積斜面では表層土壌の移動による変化が卓越するものと考えられた。

皆伐6カ月後の土壌の悪化は明瞭であったが、その後の変化をA₀層厚、A層厚、透水性について

表4-3-2 高原山におけるヒノキ、スギ林の皆伐に伴う微地形別の土壌諸特性の変化率

	微地形 残積 斜面	匍行 斜面(1)	浸潤 斜面	匍行 斜面(2)	運積 斜面	崩積 斜面	沖積 斜面
1 L層	1.8** (0)*	1.5 (0)	1.6 (0)	1.5 (0)	1.0 (0)	1.9 (0)	3.2 (0)
2 F層	1.5 (100)	1.6 (106.3)	1.2 (133.3)	1.8 (66.7)	0.4 (525.0)	1.1 (172.7)	2.8 (242.9)
3 H層	1.4 (35.7)	1.7 (76.5)	1.4 (28.6)	0.8 (0)	0 (0)	0.0 (0)	0.2 (0)
4 A ₀ 層	4.7 (42.6)	4.8 (62.5)	4.2 (47.6)	4.1 (29.3)	1.4 (150.0)	3.0 (63.2)	6.2 (109.7)
5 A11	2.7 (0)	2.6 (0)	3.5 (85.7)	4.3 (46.5)	5.4 (18.5)	0.5 (56.8)	9.3 (1.37)
6 A12	2.3 (0)	4.4 (0)	4.6 (93.5)	5.1 (58.8)	6.0 (8.3)	5.5 (65.5)	9.0 (111.1)
7 A層	7.3 (82.2)	8.7 (85.1)	8.8 (122.7)	9.8 (84.7)	11.4 (67.5)	14.9 (92.6)	18.2 (124.0)
8 礫量	2.1 (14.3)	0.6 (83.3)	6.3 (23.8)	5.7 (52.6)	29.8 (45.0)	29.3 (101.7)	27.2 (41.2)
9 根量	3.3 (109.1)	3.3 (103.0)	2.3 (104.3)	2.5 (112.0)	1.4 (114.3)	0.9 (188.9)	0.4 (225.0)
10 pH	4.59 (101.5)	4.74 (97.3)	4.49 (98.0)	4.59 (97.8)	4.94 (97.4)	4.89 (97.1)	5.66 (95.6)
11 Y1	22.7 (53.3)	16.8 (66.7)	21.2 (94.3)	27.9 (83.9)	15.5 (92.3)	16.0 (90.6)	1.9 (89.5)
12 C/N	24.2 (96.3)	22.5 (94.7)	21.2 (96.7)	21.3 (95.8)	20.1 (90.5)	18.3 (89.6)	17.7 (87.0)
13 全炭素量	16.42 (67.6)	17.47 (76.7)	15.29 (79.5)	17.48 (84.0)	14.52 (72.7)	12.62 (88.5)	12.78 (74.4)
14 全窒素量	0.68 (69.1)	0.78 (80.8)	0.72 (81.9)	0.82 (87.8)	0.73 (79.5)	0.69 (98.6)	0.72 (86.1)
15 無機態窒素量	0.34 (976.5)	1.02 (383.3)	2.46 (150.0)	2.11 (188.2)	1.92 (97.4)	2.54 (74.8)	2.32 (78.9)
16 塩基置換容量	40.8 (88.2)	46.6 (90.3)	44.9 (101.1)	49.4 (106.3)	44.6 (108.7)	48.1 (103.5)	52.0 (97.5)
17 置換性-Ca	0.86 (29.1)	2.30 (30.0)	4.24 (33.7)	4.47 (66.4)	8.55 (56.0)	8.50 (56.2)	21.72 (46.1)
18 置換性-Mg	0.46 (76.1)	0.77 (49.4)	0.90 (63.3)	0.98 (89.8)	2.21 (76.9)	2.01 (80.6)	3.64 (60.7)
19 置換性-K	0.80 (33.8)	0.85 (42.4)	0.87 (70.1)	0.95 (81.1)	1.16 (86.2)	1.28 (81.3)	1.92 (93.2)
20 アンモニア態窒素量	0.27 (1074.0)	0.93 (298.9)	1.22 (123.8)	1.33 (172.2)	0.74 (108.1)	0.57 (105.3)	0.61 (111.5)
21 硝酸態窒素量	0.07 (600.0)	0.09 (1255.6)	1.24 (176.6)	0.77 (218.2)	1.19 (89.9)	1.97 (66.0)	1.71 (67.3)
22 透水性	390 (69.7)	386 (47.4)	527 (40.4)	445 (55.5)	422 (59.2)	384 (77.3)	690 (46.4)
23 容積重	36.9 (119.8)	35.1 (119.1)	39.1 (125.1)	33.5 (117.3)	43.3 (109.7)	41.1 (113.1)	37.7 (109.8)
24 採取時水分量	36.5 (120.8)	43.4 (111.3)	43.3 (108.5)	42.2 (114.9)	40.6 (115.5)	43.3 (108.1)	46.7 (110.9)
25 最大容水量	61.7 (112.5)	63.5 (109.4)	63.5 (104.7)	64.1 (106.1)	60.8 (108.2)	63.4 (105.5)	64.1 (111.4)
26 最小容気量	21.3 (51.2)	20.0 (58.0)	19.5 (64.1)	20.3 (67.5)	19.9 (69.8)	19.1 (61.3)	19.9 (55.8)
27 粗孔隙	50.8 (83.9)	45.0 (86.9)	47.1 (82.4)	48.2 (86.5)	47.8 (87.2)	47.9 (81.8)	46.2 (86.1)
28 細孔隙	32.2 (117.1)	38.5 (109.1)	35.8 (112.6)	36.1 (110.5)	32.9 (115.2)	34.6 (113.9)	37.7 (113.5)
29 全孔隙	83.0 (96.7)	83.5 (97.1)	82.9 (95.3)	84.3 (96.8)	80.7 (98.6)	82.5 (94.4)	83.9 (98.5)

*: 変化率、(伐採後の土壌特性値) / (伐採前の土壌特性値) × 100 (%)

** : 伐採前の土壌特性値

て調査すると微地形毎に異なった回復過程が認められた(図4-3-5)。A₀層は落葉落枝の供給が皆伐直後停止するため、伐採により枝葉の集積した運積斜面と沖積斜面以外では減少する過程を示した。その後植生の回復により落葉落枝の供給が始まるため、どの微地形でもA₀は増加した。A層厚は浸潤斜面と沖積斜面で一時的に増加し、その後減少したが、他の微地形では減少後徐々に増加の過程を示した。透水性は皆伐後一様に減少したが、5年後には回復の傾向を示した。匍行斜面では回復が遅かった。残積斜面ではかなりの程度まで回復してきている。最も減少した沖積斜面では5年後には最も大きく増加を示した。この様に変化を受けた土壤の断面形態や透水性は意外と早い時期から回復が始まる。しかし、その後森林の伐期までにどの程度回復するかは林地の管理において重要な点である。また失われた養分、特にミネラルについての回復は、母岩の風化などによる限定された供給源のため容易ではないと推察される。もし回復が十分に行われない場合、長期的に攪乱が累積され地力の減退や保水機能の低下をもたらす恐れが生ずる。さらに長期的に調査を継続して行く必要がある。

第2項 ダグラスファー天然林での伐採

アメリカ合衆国北西部の樹齢350年～750年の森林を通称“Old-Growth Forest”と呼んでいるが、最近伐採により少なくなりつつある(Franklin et al. 1981)。この森林の伐採で、樹木の成長率が低下する、下流域への水の供給量が変化する、地滑りが起こる、土壤の消失が起こるな

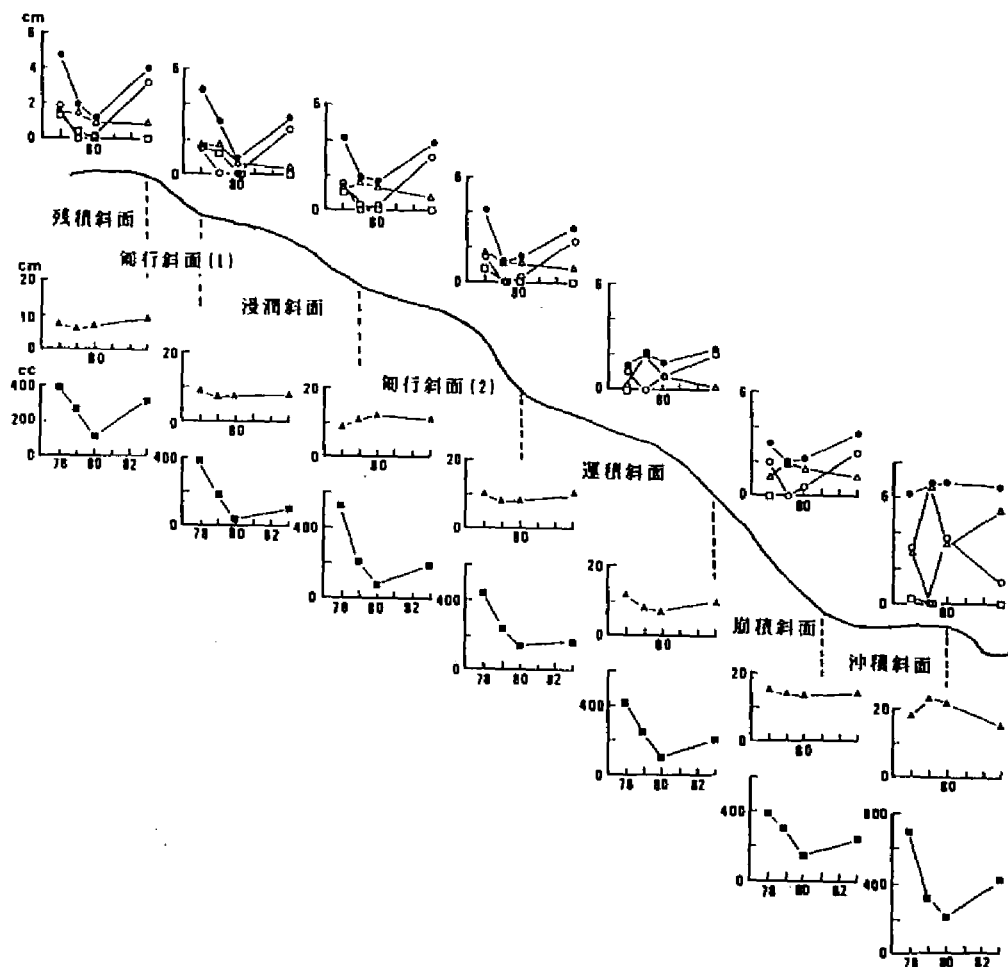


図4-3-5 高原山におけるヒノキ・スギ林の皆伐後のA₀層(●)、A層(▲)、透水性(■)の5年間の変化(○: L層、△: F層、□: H層)

ど森林生態系に様々な変化を引き起こす(Wert et al. 1981, Froelich et al. 1983, Miles et al. 1984)。特に最近では土壌の悪化に着目した報告が多くだされている。例えば土壌物理性の悪化(Dyrness 1965, 1967, Wert et al. 1981, Froelich et al. 1983, Gent et al. 1983, 1984)、養分流亡(McColl 1978, Arimitsu et al. 1981, Sollins et al. 1981, Mroz et al. 1985)、有機物の分解(Durgin 1980, Binkley 1984, Snider et al. 1985)、などで地力の回復過程についての報告も出てきている(Snyder et al. 1984, Froelich 1985)。これらの研究の結果は森林を構成する樹種の違い、伐採時期、伐採搬出方法、気候、土壌特性や地形によって相違する。今までの研究では、地形特性についてその違いから生ずる土壌の変化—伐採の影響の研究が少ない。そこで本項では微地形の数値分類を用いて天然林の伐採に伴う土壌変化を検討する。

調査地はダグラスファーの純林で1985年6月に皆伐が行われた。搬出方法は緩傾斜地ではトラクターにより、急傾斜地では架線集材が行われた。土壌の調査は伐採前の5月と伐採後の8月に行った。

2. 1 土壌の変化の機構

直接のインパクトはトラクター運行や運材による圧密、木材の移動による地表攪乱と有機物の土壌への混入、枝葉の集積、A₀層、A層、B層の除去、削剥などが主なものであった。伐採搬出後、間接的に土壌に加わったインパクトは土壌環境の変化に伴う撥水性の発現、土壌有機物の分解の促進、雨滴による表層侵食などがあげられる。これらの直接、間接のインパクトが土壌の諸特性に変化をもたらした(表4-3-3)。通常の落葉落枝よりも過剰に供給された枝葉のためA₀層は厚くなり、運材によりA層、B層は薄くなった。土壌表層は攪乱のため硬度は低くなり、圧密のため5 cmより深い所では硬くなった。土壌への有機物の混入のため全炭素・全窒素、C/N比は高原山の場合とは逆に増加し、塩基類の増加が認められた。圧密と表層攪乱は土壌の物理性に変化をもたらし、容積重の増加、粗孔隙の減少、細孔隙の増加を促し透水性は顕著に減少した。これらの変化の原因の一つに土壌の撥水性の発現があった。ダグラスファーの森林では表層土に菌糸が普遍的に分布した。これが植被を除かれ、表層が乾燥することで撥水性が発現し、最小容気量を増加させ、最大容水量と透水性を減少させた(図4-3-6)。

2. 2 微地形に対応した伐採後の土壌の変化

土壌断面形態、土壌化学性、土壌物理性にその変化パターンを調べるため主成分分析を行い(図4-3-7)、土壌諸特性の変化を微地形別にまとめた(表4-3-4)。土壌断面形態の変化は2つのパターンが認められた。第1は圧密やA層の除去、削剥によりB層の硬度が増加し、A層が薄くなる変化で、残積斜面、浸潤斜面、運積斜面(1)、崩積斜面にみとめられた。第2の変化は伐採により供給された枝葉の集積によるA₀層の増加で、残積斜面、浸潤斜面、匍行斜面(2)、崩積斜面に認められた。土壌の化学性の変化には3つのパターンが認められた。第1は置換性塩基類とpHの増加の変化で、運積斜面(1)で顕著に認められた。第2の変化は有機物の土壌への混入がもたらすもので、全炭素・全窒素の増加と塩基置換容量の増加が浸潤斜面や運積斜面に主として認められた。第3の変化は表層土壌の移動、除去、削剥による土壌有機物の減少と置換性塩基類の減少で、匍行斜面(1)を主に残積斜面と崩積斜面に認められた。土壌の物理性の変化は2つあり、第1は表層攪乱と有機物混入による気相と最小容気量の増加する変化で、匍行斜面(1)(2)で顕著に認められた。第2は容積重と固相部分の増加をもたらす変化で、残積斜面と浸潤斜面に

表4-3-3 アンドリュース実験林における
ダグラスファー林の皆伐に伴う土壌諸特性の
変化

土壌特性 (Soil Profile)	伐採前	伐採後
1. A ₀ thickness	4.6 ± 4.2 ¹	8.1 ± 9.0 cm
2. A ₁ thickness	4.6 ± 2.0	2.5 ± 2.4 cm
3. B ₁ thickness	31.2 ± 10.2	27.9 ± 8.7 cm
4. Hardness of surface	0.9 ± 0.4	0.5 ± 0.3 kg/cm ²
5. Hardness of B	1.3 ± 0.7	1.7 ± 1.9 kg/cm ²
6. Root contents	3.2 ± 2.6	3.0 ± 2.2 g/400cc
7. Gravel contents	68.7 ± 28.1	71.2 ± 28.0 g/400cc
(Chemical Properties)		
8. pH	5.14 ± 0.40	5.21 ± 0.33
9. Total Carbon	7.77 ± 7.32	9.23 ± 3.54 %
10. Total Nitrogen	0.23 ± 0.05	0.25 ± 0.06 %
11. C/N ratio	33 ± 5	36 ± 12
12. C.E.C.	51.3 ± 10.7	54.7 ± 12.3 ae/100g
13. Exchangeable Ca	7.28 ± 7.32	8.20 ± 7.69 ae/100g
14. Ex. K	0.68 ± 0.21	0.75 ± 0.24 ae/100g
15. Ex. Mg	1.05 ± 1.20	1.36 ± 1.43 ae/100g
16. Ex. Na	0.11 ± 0.14	0.17 ± 0.20 ae/100g
(Physical Properties)		
17. Water permeability	254 ± 187 ²	53 ± 79 cc/min.
18. Bulk density	52.4 ± 8.4 ³	59.1 ± 11.4 g/100cc
19. Solid phase	27.5 ± 2.8	29.3 ± 2.8 %
20. Liquid phase	27.2 ± 4.8	21.1 ± 7.5 %
21. Gaseous phase	45.3 ± 6.0	49.6 ± 8.6 %
22. Water maximum	44.6 ± 5.8	40.6 ± 12.5 %
23. Air minimum	27.9 ± 6.6	30.1 ± 13.8 %
24. Total porosity	72.5 ± 2.8	70.5 ± 3.1 %
25. Fine porosity	24.0 ± 3.4	25.4 ± 4.7 %
26. Coarse porosity	48.5 ± 4.9 ⁴	45.3 ± 6.3 %

*1: Means ± standard deviation.

*2: Saturated hydraulic conductivity measured with a 100 cm² x 4 cm core and a 2 cm water head.

*3: without roots and gravels.

*4: Coarse porosity is equivalent to pF 2.7 tension and/or less.

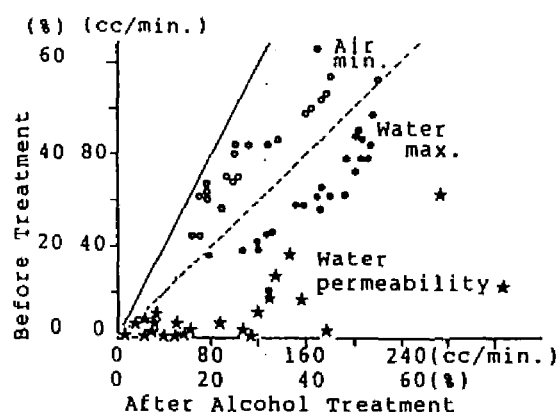


図4-3-6 アンドリュース実験林における
ダグラスファー林の皆伐後の発水性による土壌
物理性の悪化
(皆伐後採取した採土円筒試料をアルコール処
理前後で分析)

認められ、これはトラクターによる圧密が主たる原因と思われた。土壌の物理性の変化は撥水性や圧密により透水性の低下を引き起こしている。

微地形別の土壌変化の特徴をあげると、A₀層は明らかに匍行斜面(1)と運積斜面(1)で減少し、ここでは枝葉条の集積がなくまた堆積有機物が動き易い地形と考えられる。一方、伐採に伴って供給された枝葉条は残積斜面、浸潤斜面と崩積斜面に集積し、A₀層は厚くなっている。A層厚は運積斜面(2)と崩積斜面で顕著に減少した。表層土の移動が引き起こしたもので、これに対応してB層厚の減少が匍行斜面(1)と崩積斜面で認められた。表面侵食や集材時の木材通過による攪乱が原因であった。全炭素・全窒素は残積斜面と崩積斜面を除いて増加している。塩基置換容量は浸潤斜面で、置換性塩基類は運積斜面(1)で明瞭に増加の傾向を示した。容積重の増加は透水性の低下を伴って残積斜面に顕著に認められた。ここでは緩傾斜のためトラクター集材が行われその攪乱と圧密によるものと思われた。撥水性による物理性の悪化は匍行斜面(1)に強く現れ、その結果ここでは透水性の低下が明かであった。

伐採による土壌の変化を傾斜角(Dyrness 1965, 1967)、斜面位置(Sollins et al. 1981)、標高(Binkley 1984)など地形との関連で検討した例はある。本項では数値分類された微地形により土壌の変化パターンが相違する点を明らかにした。この微地形単位毎にみることでより詳細に伐採インパクトによる土壌の変化過程が明らかにされたと思われる。特に浸潤斜面、匍行斜面、運積斜面は伐採搬出時に土壌の悪化を顕著に受ける微地形と考えられ、森林施業はこれらの微地形を保全するように心がける必要がある。

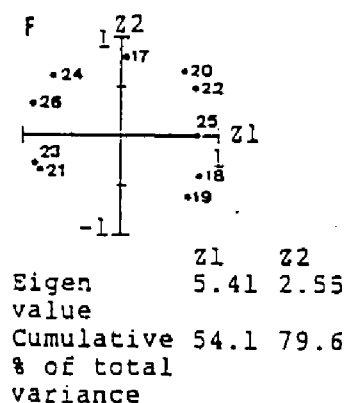
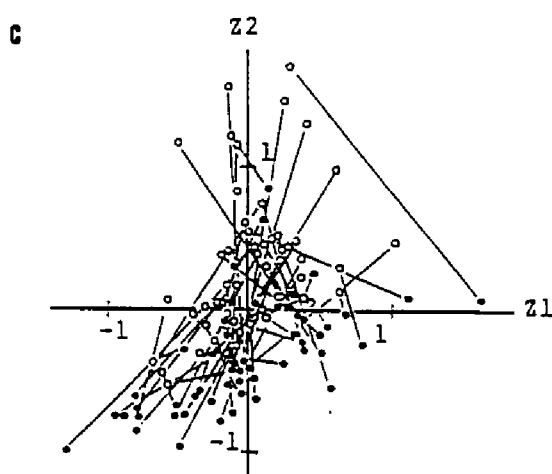
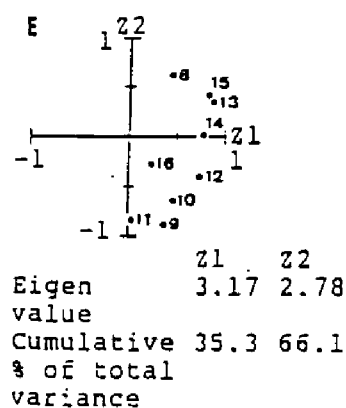
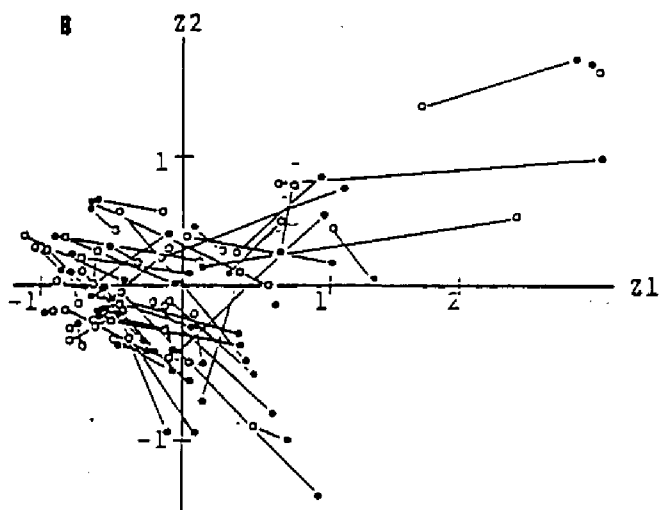
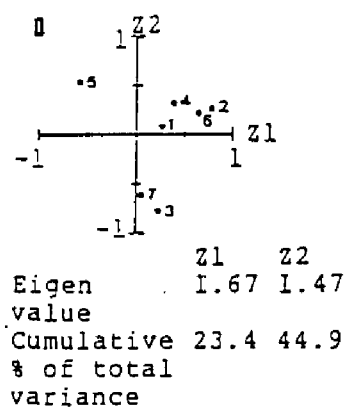
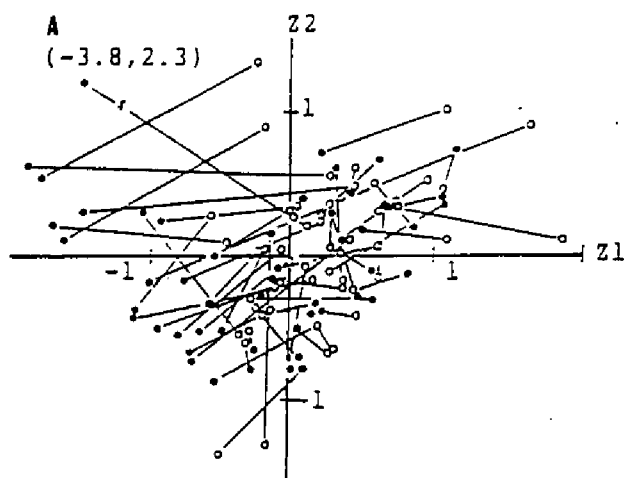


図4-3-7 アンドリュース実験林におけるダグラスファー林の皆伐による土壌特性値の変化パターン。主成分分析による第1主成分と第2主成分のスコア散布図(A、B、C)と因子負荷量(D、E、F)。(A、D：土壌断面形態、B、E：土壌化学性、C、F：土壌物理性)D、E、Fの番号は表4-3-3による。(○：伐採前、●：伐採後)

表4-3-4 アンドリユース実験林におけるダグラスファー林の皆伐に伴う微地形別の土壌諸特性の変化率

Soil properties	残積 斜面	浸潤 斜面	匍行 斜面(1)	運積 斜面(1)	運積 斜面(2)	匍行 斜面(2)	崩積 斜面
(Profile)							
1.Ao thickness* ¹	3.8	4.3	3.8	5.3	3.1	6.0	10.2
	* ² (218.4)	(183.7)	(71.1)	(50.9)	(122.6)	(198.3)	(184.3)
2.A thickness	5.1	4.7	6.6	3.7	2.9	4.1	6.1
	(60.8)	(40.4)	(72.7)	(35.1)	(79.3)	(48.8)	(32.8)
3.B thickness	25.2	30.0	26.3	30.8	36.7	38.0	39.0
	(94.8)	(88.0)	(76.0)	(110.4)	(85.0)	(89.5)	(71.3)
4.A hardness (0 - 5 cm)	0.9	1.1	1.2	0.7	0.7	0.7	0.5
	(55.6)	(45.5)	(50.0)	(42.9)	(71.4)	(57.1)	(120.0)
5.B hardness (5 cm -)	1.4	1.5	2.4	0.9	1.0	1.0	0.6
	(142.9)	(226.7)	(75.0)	(100.0)	(110.0)	(100.0)	(183.3)
(Chemical properties)							
6.pH	5.21	5.17	4.70	4.76	5.17	5.15	5.15
	(101.7)	(99.0)	(105.5)	(107.1)	(99.6)	(101.4)	(106.0)
7.Total Carbon	8.59	7.97	6.91	7.65	7.10	6.63	8.07
	(100.5)	(139.4)	(128.5)	(135.4)	(128.5)	(127.1)	(107.2)
8.Total Nitrogen	0.25	0.23	0.20	0.22	0.23	0.22	0.23
	(100.0)	(100.0)	(110.0)	(118.2)	(104.3)	(118.2)	(113.0)
9.C/N ratio	35	35	34	35	31	30	35
	(97.1)	(111.4)	(111.8)	(114.3)	(119.4)	(110.0)	(97.1)
10.C.E.C.	47.0	44.4	50.9	53.2	54.6	57.0	65.5
	(99.8)	(116.9)	(100.8)	(113.3)	(101.3)	(113.5)	(105.3)
11.Ex. Ca* ³	6.19	5.33	3.88	3.26	9.13	9.96	12.34
	(101.0)	(102.4)	(87.3)	(254.3)	(89.7)	(132.6)	(131.8)
12.Ex. K	0.64	0.66	0.79	0.56	0.94	0.64	0.77
	(117.2)	(103.0)	(79.7)	(137.5)	(75.5)	(145.3)	(90.9)
13.Ex. Mg	0.71	0.57	0.85	0.72	1.44	1.52	2.26
	(146.5)	(135.1)	(77.6)	(181.9)	(105.6)	(140.8)	(115.9)
14.Ex. Na	0.06	0.15	0.11	0.03	0.21	0.10	0.14
	(233.3)	(53.3)	(463.6)	(733.3)	(109.5)	(120.0)	(42.9)
(Physical properties)							
15.Water permeability	245	153	98	213	342	295	359
	(7.8)	(18.3)	(34.7)	(55.9)	(14.0)	(29.8)	(39.3)
16.Bulk density	50.6	51.4	58.2	55.4	54.4	54.6	46.2
	(117.8)	(115.6)	(99.5)	(111.2)	(111.2)	(107.9)	(111.5)
17.Solid phase	26.8	27.3	27.8	29.3	28.2	28.0	26.4
	(111.6)	(108.8)	(95.0)	(102.0)	(106.0)	(106.8)	(98.1)
18.Liquid phase	25.8	23.1	26.5	30.6	29.8	29.6	28.8
	(76.0)	(93.1)	(62.6)	(57.8)	(76.5)	(82.1)	(81.6)
19.Gaseous phase	47.4	49.6	45.7	40.1	42.1	42.4	44.9
	(106.8)	(98.4)	(124.9)	(130.7)	(112.4)	(108.0)	(112.9)
20.Water maximum	42.7	38.8	44.7	46.5	48.2	48.3	47.4
	(88.1)	(108.5)	(77.4)	(93.1)	(90.0)	(82.4)	(96.8)
21.Air minimum	30.5	33.9	27.6	24.3	23.7	23.6	26.3
	(104.6)	(77.0)	(142.0)	(110.3)	(112.7)	(128.4)	(107.2)
22.Total porosity	73.2	72.7	72.2	70.7	71.8	72.0	73.7
	(95.8)	(95.3)	(101.3)	(99.2)	(97.6)	(97.4)	(100.5)
23.Fine porosity	23.5	21.6	24.2	26.5	25.2	25.0	23.3
	(103.4)	(117.1)	(100.8)	(98.1)	(100.8)	(110.8)	(113.3)
24.Coarse porosity	49.7	51.1	48.0	44.2	46.6	47.0	50.4
	(92.4)	(88.3)	(102.5)	(99.8)	(95.9)	(90.2)	(94.8)

*1: Before harvest, unit are same in tab.4-3-3.

*2: Changing rate, (After harvest)/(Before harvest)x100 (%).

*3: Exchangeable Cation.

第4節 土壤特性方程式—地形関数の解析

土壤型と微地形との対応関係が明瞭であることは先に述べてきた。本節では、この対応関係を量的に比較する、あるいは微地形特性値の変化によって土壤の諸性質の変化を予測するために微地形—土壤の関係を数式化することを試みた。

土壤特性値と地形との関係を方程式で解いた例は Jenny (1961) の状態因子方程式の規定以来数多くある。主な例としては、

(1) $y = a + b x$

例えば $y = 0.0994 + 0.0003437x$ (Aandahl 1948)

(y:窒素、x:斜面長)

$y = 5.2 - 0.16x$ (Furley 1968)

(y:pH、有機炭素、全窒素、x:傾斜角、 $r = -0.906$ 、斜面位置別)

$y = 38.5 - 0.486x$ (Vreeken 1973)

(y:粘土含量、x:傾斜角、 $r^2 = 0.661$ 、尾根と斜面別)

$y = 9.964 + 2.748x$ (Leow & Smith 1981)

(y:土性、pH、x:傾斜角、相対距離、 $r = 0.8782$ 、母材別)

(2) $y = a + b x + c x^2 + d x^3 +$

例えば $y = 2.19 - 0.31x + 0.22x^2 - 0.017x^3$ (Walker & Ruhe 1968)

(y:平均粒径、有機炭素、 CaCO_3 、x:山頂からの距離、 $r^2 = 0.93$)

$y = 11.6 + 0.02148L^4$ (Kleiss 1970)

(y:C.E.C.、粒径、粘土、全炭素、L:山頂からの距離、斜面の位置別)

(3) $y = a + b x_1 + c x_2 + d x_3 +$

例えば $y = 44.22 + 12.22x_1 - 0.46x_2 + 0.48x_3$ (Walker, Hall, Protz 1968)

(y:土壤断面形態、x:傾斜角、標高、方位、曲率、 $r = 0.28$)

$y = 1.31 + 0.023x_1 + 0.0009x_2$ (Ruhe & Walker 1968)

(y:粘土層の厚さ、A層の厚さ、x:傾斜角、尾根からの距離)

以上の様に1次回帰、重回帰、多項式などへの当てはめが主なものである。しかしこれらは標

表4-4-1 高原山における土壤特性値と微地形特性値の相関行列

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
24	.29	.68	.24	-.51	.31	-.22	-.58	-.17	.09	.50	-.03	.82	.34	.45	.34	.41	.22	-.05	.33	.05	.06	-.00	.14
25	-.22	.78	.70	-.78	.64	-.44	-.83	-.50	-.18	.41	-.34	.65	.19	.70	.71	.72	.04	.28	.24	.03	-.10	.02	-.13
26	.22	-.78	-.70	.78	-.64	.44	.83	.50	.18	-.41	.34	-.65	-.19	-.70	-.71	-.72	-.04	-.28	-.24	.03	.10	-.02	.13
27	-.29	.73	.69	-.73	.60	-.38	-.82	-.47	.13	.44	-.27	.62	.20	.68	.70	.70	.03	.25	.24	.02	-.10	.01	-.12
28	.32	-.71	-.69	.71	-.59	.36	.81	.48	.15	-.42	.28	-.60	-.17	-.64	-.68	-.68	-.00	-.27	-.25	.02	.11	-.00	.12
29	-.31	.69	.68	-.73	.51	-.32	-.82	-.44	-.10	.54	-.19	.67	.23	.68	.67	.68	.05	.25	.24	.02	-.09	.02	-.13
30	.51	.61	.17	-.41	.52	-.42	-.50	-.25	-.05	.19	-.28	.38	.28	.60	.43	.58	.28	-.06	.27	.12	.02	-.01	.17
31	.19	.80	.82	-.70	.64	-.46	-.80	-.42	-.09	.44	-.28	.63	.31	.77	.67	.76	.19	.11	.21	.10	-.04	-.01	.03
32	-.34	.34	.63	-.44	.37	-.10	-.47	.33	.13	.17	.19	.30	-.20	.40	.17	.50	.16	.29	.06	.12	-.04	.07	-.27
33	-.45	.41	.69	-.51	.36	-.21	-.59	-.22	-.08	.48	-.05	.53	.18	.64	.87	.64	.10	.26	.16	-.02	.10	-.01	-.14
34	.44	.01	-.19	.10	.21	.20	.22	.03	-.08	-.34	-.14	-.25	-.08	.12	.01	.10	.12	-.00	.04	-.01	.02	.08	.11
35	-.04	.05	.07	-.02	.10	-.12	-.04	-.12	-.11	.11	-.08	.16	-.09	.17	.16	.21	-.08	-.02	-.12	.11	.10	.05	-.04
36	.15	.32	.28	-.27	.12	-.17	-.41	-.39	-.23	.04	-.25	.21	-.09	.07	.07	.12	.03	.20	.17	-.08	-.01	.08	-.01
37	.10	.50	.46	-.44	.66	-.48	-.45	-.45	-.29	.17	-.29	.37	.01	.65	.58	.66	.17	.29	.25	-.02	-.08	.13	.01
38	-.37	.21	.43	-.28	.17	-.05	-.40	-.18	-.01	.35	-.08	.39	.11	.28	.36	.30	.00	.14	.00	-.03	-.05	.08	-.20
39	.04	.46	.44	-.43	.62	-.45	-.36	-.33	.18	.15	-.21	.29	.10	.71	.62	.70	.23	.29	.21	-.03	-.09	-.04	.18
40	.09	.35	.29	-.23	.19	-.28	-.29	-.44	-.30	.12	-.28	.31	.16	.19	.19	.28	.05	.15	.04	.15	.09	.00	-.04
41	-.27	.38	.31	-.27	.26	-.28	-.40	-.27	-.13	.37	-.18	.47	.11	.41	.43	.45	.04	.20	.19	-.01	-.08	-.03	-.05
42	-.22	-.27	-.05	.28	-.18	.22	.14	.31	.17	-.15	.12	-.24	-.22	-.37	-.21	-.33	.23	.11	.14	.01	-.01	.00	-.01
43	-.53	.22	.44	-.35	.08	-.01	-.46	-.19	.00	.48	.06	.44	.13	.24	.31	.25	.00	.14	.04	.03	-.04	.06	-.17
44	-.14	.74	.67	-.71	.64	-.67	-.79	-.53	-.21	.42	-.31	.64	.18	.78	.73	.73	.11	.23	.26	.00	-.08	-.02	-.08
45	-.34	-.41	-.23	.30	-.45	.42	.29	.33	.25	-.02	-.29	-.22	.02	-.47	-.37	-.49	-.16	-.17	-.18	.04	.00	.06	-.06
46	.06	.27	.16	-.23	.14	-.03	-.29	-.06	.06	.03	-.07	.08	.17	.08	.08	.05	.08	.06	.20	.12	-.10	-.02	.03

1 A層、2 A層、3 B層、4 C層、5 pH、6 Y₁、7 C/N、8 全炭素、9 全窒素、10 無機態窒素、11 H₂O-N、12 NO₃-N、13 C.E.C.、14 e x Ca、15 e x Mg、16 e x K、17 過水性、18 容積量、19 水分量、20 最大吸水量、21 最小吸水量、22 孔隙度、23 細孔隙度、24 A層(7.9)、25 MCH、26 MDH、27 MCL、28 MDL、29 MCS、30 MDS、31 MRL、32 AZI、33 USU、34 USL、35 USLE、36 USR、37 URI、38 USC、39 URL、40 UCL、41 UCA、42 UDA、43 UDA、44 ZLI、45 ZL2、46 ZL3

表 4-4-2 三浦実験林における土壌特性値と微地形特性値の相関行列

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
26	-0.08	.35	.07	-.15	-.24	-.25	-.01	.33	-.26	-.26	.16	.10	.26	.01	.28	.01	.04	-.02	-.10	.44	.00	.00	-.04	-.23	-.02
27	-.20	.07	-.13	-.06	.09	.30	-.01	-.07	.15	.37	-.28	-.08	-.37	-.18	-.24	-.08	.21	.09	.06	-.11	-.04	.00	-.05	.16	-.01
28	.18	.17	.02	.21	-.22	.04	-.08	.01	-.10	.01	.09	-.13	-.01	-.13	.12	-.20	.01	.14	.14	-.04	.17	.14	.11	.01	-.05
29	-.08	.53	.01	.19	-.29	-.18	.03	.34	-.07	-.13	.06	.08	.13	-.09	.24	-.07	.04	.04	-.11	.41	-.07	.01	.06	-.10	.02
30	.08	-.33	.01	.19	-.29	-.18	.03	.34	-.07	-.13	.06	.08	.13	-.09	.24	-.07	.04	.04	-.11	.41	-.07	.01	.06	-.10	.02
31	-.11	.14	.11	-.27	-.40	-.23	-.09	.25	-.16	-.21	.23	-.05	.21	-.09	.32	-.14	.11	.02	.05	.35	.01	.06	.03	.19	-.04
32	.08	-.17	.07	.22	.32	.22	.04	-.31	.16	.22	-.16	-.05	-.22	.04	-.29	.06	-.07	.01	.06	-.11	.02	-.05	.01	.21	.07
33	.03	-.55	.03	.23	.34	.14	.07	-.45	.22	.28	-.23	-.01	-.28	.08	-.38	.11	.02	-.12	.03	.49	-.10	-.16	-.03	.16	.07
34	-.09	.46	.06	-.24	-.31	-.18	-.05	.31	-.12	-.18	.11	.04	.16	-.06	.21	-.05	.11	-.03	-.11	.43	.00	.01	-.05	-.21	-.04
35	.06	-.19	.07	.23	.33	.19	.04	-.38	.19	.23	-.18	-.23	-.23	.05	-.31	.09	-.06	.05	.03	-.13	.07	.09	.01	.18	.00
36	.16	-.12	.12	-.00	.00	.11	-.12	-.09	-.11	-.07	.22	-.20	.07	-.02	.10	-.25	.16	.22	.28	.31	.28	.16	.17	.04	-.10
37	-.22	-.08	-.17	.07	.21	.31	.05	.08	.33	.28	-.23	-.05	-.29	-.15	-.18	-.07	.10	.08	.09	.05	.08	.00	.15	.28	.06
38	-.16	-.14	-.18	.10	.24	.20	-.03	-.09	.26	.20	-.10	-.10	-.20	-.08	-.14	-.06	.06	.05	.06	.15	.08	.11	-.07	.33	.05
39	.09	.06	-.59	.15	.16	.01	.17	.03	.10	.04	-.17	.17	-.04	.03	-.01	.65	-.41	.21	.14	.27	.20	.15	.08	.23	.11
40	.41	-.08	-.17	.07	-.09	-.11	-.03	-.20	-.12	-.12	.17	-.09	.12	.07	.06	-.07	-.20	.18	.23	.38	.22	.07	.21	.06	-.02
41	-.28	-.11	-.17	-.02	.13	.26	.03	.00	.36	.31	.25	-.05	-.31	.16	-.19	-.04	.23	-.11	-.11	-.03	-.12	-.04	-.08	.35	-.05
42	.37	.29	.33	.03	-.02	.06	.00	.07	-.03	-.11	.16	-.07	.11	-.11	.23	-.19	-.36	.31	.27	.19	.35	.27	.13	.20	.09
43	-.35	-.07	.28	-.13	-.04	.17	.01	.18	.34	.36	-.32	-.01	-.36	-.03	-.38	.10	.50	-.35	-.30	-.28	-.37	.25	-.10	-.19	-.12
44	-.01	.01	-.07	-.08	.05	.25	-.02	-.19	.38	.31	-.18	-.13	-.21	.13	.22	.10	.12	-.01	-.03	-.25	.04	.04	.05	.16	.00
45	.21	-.32	.06	.07	.03	-.18	-.04	-.28	-.22	.20	.01	.22	.24	.00	.08	-.28	.26	.31	-.25	.30	.13	.28	-.03	-.12	.12
46	.06	-.18	-.02	.08	.05	.18	-.08	-.17	.27	.22	.10	-.12	-.22	-.11	-.11	-.29	.07	.04	.11	.35	.06	.02	.11	.31	-.06
47	.02	.27	.07	.12	.07	.27	.00	-.13	.38	.30	-.19	-.10	-.20	-.16	-.17	-.12	.16	.04	.03	.11	.02	.03	.03	.03	.04
48	-.18	-.10	-.01	.10	.22	.20	.07	.28	.35	.32	-.24	-.07	-.32	-.06	-.29	.00	.13	.09	.01	.28	.02	.03	.00	.23	.00
49	.17	-.07	.02	-.14	-.26	-.38	.01	.11	.37	.35	.32	-.00	.35	.11	.29	-.01	.20	.15	.12	.22	.13	.12	.09	-.22	-.01
50	.38	-.01	.17	.04	-.07	-.20	-.01	-.17	-.28	-.22	.21	-.02	.22	.15	.10	-.01	-.26	.17	.21	.24	.19	.07	.16	-.10	-.01

1 ヒノキ, 2 ツツジ, 3 A, 4 B, 5 A, 6 B, 7 根, 8 透水性, 9 容積量, 10 固相, 11 堆積層, 12 堆積層, 13 全孔隙, 14 最大容水量, 15 最小容水量, 16 採取水分量, 17 pH, 18 全炭素, 19 全窒素, 20 C/N, 21 C, E, C, 22 exCa, 23 exK, 24 exMg, 25 B, C/A, C, 26 ZL1, 27 ZL2, 28 ZL3, 29 ALT, 30 MCH, 31 MDH, 32 MRH, 33 MCL, 34 MDL, 35 MRL, 36 NCS, 37 MDS, 38 MRR, 39 AZI, 40 USU, 41 USL, 42 USL, 43 USR, 44 URL, 45 USC, 46 URL, 47 UCL, 48 UCA, 49 UDA, 50 URS

表 4-4-3 赤石山脈における土壌特性値と微地形特性値の相関行列

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
25	10	29	32	36	50	.15	.01	.15	.22	-.27	-.12	-.08	.16	-.04	-.16	.05	.08	.20	.29	.10	.13	.09	-.39	.11
26	-.12	.09	-.12	-.33	.14	.13	.23	-.32	.07	.17	.13	.14	-.03	.18	.01	-.12	-.20	.18	-.01	.02	-.03	.19	.06	-.03
27	.24	-.12	.20	.09	-.30	.07	-.02	.33	.18	-.20	.02	-.09	.06	-.01	-.05	-.17	.13	.01	.15	-.02	.15	.03	-.07	.06
28	.01	.06	.42	.30	-.44	-.09	-.12	.10	.01	-.40	-.04	-.15	.25	.23	.05	.02	-.23	.38	.17	.30	-.21	.36	.25	.15
29	.18	.29	-.23	-.11	.40	-.21	-.12	-.33	-.28	.18	.01	.01	-.13	-.03	.13	.13	-.12	-.22	-.26	-.07	.15	-.18	.26	.10
30	.05	.18	.05	-.05	.15	-.18	-.17	-.07	-.26	.01	.09	-.20	.08	-.13	.02	.08	.17	-.21	-.08	.23	.29	.24	.05	.07
31	-.23	.30	-.21	-.12	.41	-.17	-.08	-.28	.25	.18	.09	.01	-.14	-.09	.10	-.17	-.14	-.18	-.22	.03	.16	-.17	.18	.07
32	.12	.22	.02	-.08	.14	-.09	-.07	-.07	-.17	.09	.22	-.13	-.02	-.20	.09	.10	.12	-.18	-.07	.19	.17	-.22	.08	.06
33	.00	.12	-.16	-.07	.31	-.21	-.14	-.18	-.20	.15	-.02	.03	-.08	-.05	.03	.04	-.01	-.23	-.23	-.07	.13	-.18	.28	.06
34	-.22	.07	-.17	-.08	.22	-.10	.00	-.36	-.08	.03	-.13	.03	.04	.17	.19	-.16	-.01	.03	.01	.08	-.08	.07	.08	.03
35	-.15	.13	-.21	-.10	.34	-.20	-.09	-.34	-.18	.11	-.18	.04	-.08	-.07	.18	-.08	-.01	.12	.15	.01	.13	-.07	.23	.02
36	.12	.15	.08	.01	.63	.05	.04	.02	.08	-.03	.09	-.02	.05	-.14	.08	-.03	.07	.63	.63	.10	.15	.01	.06	.18
37	.12	.14	-.14	-.15	-.23	-.16	-.11	-.11	.03	.06	.04	-.11	-.07	.12	.12	.09	-.24	-.18	-.11	-.01	.12	.29	.06	.06
38	-.11	.14	.08	.13	-.17	.13	.10	.06	.09	-.10	.11	.02	.10	.08	-.13	.17	-.12	.28	.18	.16	.04	.16	.30	.12
39	.37	.23	-.18	-.38	.36	.08	.23	-.51	-.04	.30	.28	-.17	-.21	.05	.06	-.05	.19	.03	.13	-.02	.10	.07	.22	.16
40	.17	.13	-.23	-.34	.25	-.00	.08	-.25	.04	.27	-.00	.14	.03	.18	.07	-.04	.19	.02	.18	-.05	-.08	.08	.19	.07
41	.15	.23	-.27	-.44	.39	.01	.16	-.48	-.08	.28	.14	.13	-.12	.14	.07	-.11	.19	.01	.17	-.05	-.09	.08	.25	.07
42	.15	.18	-.12	-.12	.18	-.17	.15	-.01	-.15	.07	.05	-.08	-.06	-.05	.14	-.07	.11	.31	-.22	-.18	-.00	.16	.35	.13
43	.08	.05	-.09	-.06	.15	-.14	-.12	-.08	-.18	-.18	-.05	-.12	.03	-.02	-.01	.10	.08	-.08	-.03	.07	.06	-.08	.04	.21
44	-.18	.22	-.25	-.42	.36	.03	.19	-.46	-.05	.33	.18	.16	-.12	.12	.07	-.05	.22	.05	.18	-.04	.11	.09	.24	.14
45	.10	.23	-.24	-.32	.33	-.11	.01	-.36	-.13	.16	.17	.08	.08	.08	.15	-.16	.03	.12	-.18	-.08	-.04	.04	.28	.03
46	.17	-.22	.07	.20	-.27	.19	.08	.36	.21	-.08	.01	-.01	-.01	-.18	-.15	.00	.15	-.04	.10	.00	.08	-.05	.10	-.04
47	.14	.12	-.18	-.15	.19	-.09	-.06	-.08	-.08	.07	.10	-.01	-.10	-.05	.11	.15	.13	-.25	-.13	.10	.01	.14	.27	.16

1 A, 2 B, 3 A, 4 B, 5 pH, 6 全炭素, 7 全窒素, 8 C/N, 9 C, E, C, 10 exCa, 11 exK, 12 exMg, 13 B, C/A, C, 14 BCN/ACN, 15 透水性, 16 容積量, 17 堆積層, 18 堆積層, 19 全孔隙, 20 最大容水量, 21 最小容水量, 22 水分量, 23 根, 24 根, 25 ZL1, 26 ZL2, 27 ZL3, 28 ALT, 29 MCH, 30 MDH, 31 MCL, 32 MDL, 33 MCS, 34 MDS, 35 MRL, 36 AZI, 37 USU, 38 USL, 39 USR, 40 USL, 41 URL, 42 USC, 43 URL, 44 UCL, 45 UCA, 46 UDA, 47 URS

表 4-4-4 三浦実験林の西向き地形カタナにおける微地形特性値と土壌特性値の相関行列

	MCH	MRL	URL	URS
A 層厚	.25	.11	.07	.30
容積量	-.07	-.03	.31	-.03
透水性	-.49	-.31	-.44	-.04
容積量	.60	.33	.46	.30
全炭素	-.44	-.07	-.33	-.23
C/N	-.52	-.35	-.17	-.50
ex Ca	-.39	.03	-.58	-.23

表 4-4-5 赤石山脈野呂川越地形カタナにおける微地形特性値と土壌特性値の相関行列

	MCH	URL	URS
A 層厚	-.06	-.62	-.68
容積量	-.47	.62	.34
容積量	.11	.69	.60
全炭素	-.81	.42	.64
C/N	.07	-.47	-.48
ex Ca	.64	.75	.36

本数が少なかったり、Furley, Kleiss, Vreeken にみられるように尾根部と斜面部に区分してそれぞれの回帰を求めたりしている。第 3 章第 1 節でみたように微地形の組合せと出現序列はそれぞれの地形カタナによって異なるし、第 4 章第 1 節で明らかにしたように残積斜面、浸潤斜面、匍行斜面と運積斜面、崩積斜面、沖積斜面とは土壌の物理化学性に相当の違いがあり地形形態の変換点が介在する。そのため尾根と斜面別、あるいは斜面の位置別に地形関数の解析が行なわれてきたと考えられる。

しかし、本研究では微地形は多くの微地形特性値を用いて総合的に表現された。また対象とする調査地が 1 つの地形カタナか、複数の地形カタナから構成されているかにより土壌特性値と微地形特性値間の相関性は異なってくる。1 地形カタナを対象とした高原山の事例、4 地形カタナの三浦実験林、複数の地形カタナの赤石山脈での土壌特性値と微地形特性値との関係でもこの点は明瞭に示された(表 4-4-1, 表 4-4-2, 表 4-4-3)。各特性値間の 1 対 1 の関係ではその相関性が地形カタナの数が増加する程に低くなった。しかし三浦実験林や赤石山脈から一

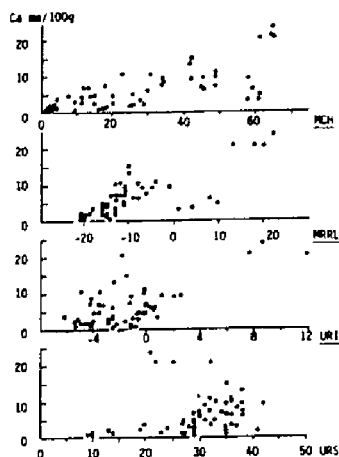


図 4-4-1 高原山における微地形特性値と置換性カルシウムとの関係

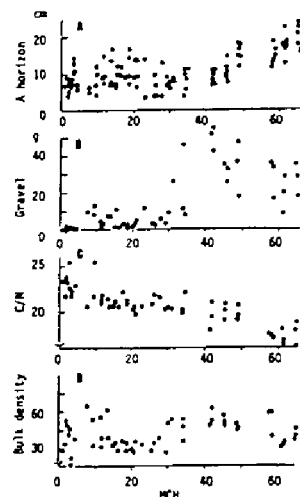


図 4-4-2 高原山における集水高 (MCH) と土壌特性値 (A: A 層厚、B: 礫含量、C: C/N 比、D: 容積重)

つの地形カテナを抽出してみるとその相関性は複数の地形カテナを合わせたものより高くなった (表 4-4-4、表 4-4-5)。この事は各地形カテナが示す土壌特性の平均値に差異が大きく、地形カテナ間でもその微地形特性値が大きく相違する事によると推測される。

では高原山の 1 地形カテナで土壌特性値と微地形特性値の関係を検討してみると、集水高、起伏指数、縦断線型性と土壌の諸特性に 1 次的相関が認められる (表 4-4-6)。さらに多項式に当てはめると、

$$y = 22.855 - 0.081x_1 \quad (r^2 = 0.6952)$$

$$y = 23.166 - 0.075x_1 - 0.026x_2 - 0.017x_3 \quad (r^2 = 0.6734)$$

$$y = 22.242 - 0.023x_1 + 0.051x_2 - 0.039x_3 - 0.119x_4 - 0.005x_5 - 0.015x_6 \quad (r^2 = 0.7408)$$

(y : C/N、 x_1 : MCH、 x_2 : URI、 x_3 : URS、 x_4 : MRRL、 x_5 : UCA、 x_6 : UDA)

となり多項式で表わし得る。このように検討してくるとどの様な回帰でも普遍的な解ではなく、Yaalon (1975) の述べたように、その調査地の例解に過ぎない。また図 4-4-1 や図 4-4-2 の関係を回帰式で表わしたに過ぎない。しかし、これらの式は決して無意味なものでない。例えば置換性カルシウム (y) と起伏指数 (x) との関係は次の様に示された。

高原山

$$: y = 7.913 + 1.057x \quad (r = 0.6505)$$

三浦実験林の西向地形カテナ

$$: y = 1.543 - 0.276x \quad (r = -0.5795)$$

赤石山脈野呂川越地形カテナ

$$: y = 1.227 + 0.134x \quad (r = 0.7500)$$

三浦実験林の湿性鉄型ポドゾルの置換性カルシウムの量は他の 2 例とは異なり凹型面で減少することが解る。また高原山と野呂川越カテナでは切片と傾きの値が相違し、平行斜面～凹型斜面では高原山で置換性カルシウムがより多いことを示す。この様に褐色森林土、乾性ポドゾルと湿性鉄型ポドゾルの、または山地帯の土壌と亜高山帯の土壌の性質との相違を回帰式で表わすことが

表 4-4-6 高原山における土壌特性値と微地形特性値との関係 ($Y = a + bX$ 、 Y ：土壌特性値、 X ：微地形特性値、 R ：相関係数)

	Y	X	a	b	R
(1)	A 層厚	MCH	4.339	0.240	0.7777
	重量	MCH	-16.825	1.110	0.7002
	全炭素量	MCH	24.597	-0.324	-0.5043
	C/N	MCH	23.865	-0.117	-0.8337
(2)	A 層厚	MRR L	15.541	0.460	0.7971
	重量	MRR L	42.982	2.967	0.5151
	全炭素量	MRR L	8.151	-0.761	-0.4223
	C/N	MRR L	18.271	-0.240	-0.7984
(3)	A 層厚	UR I	14.329	2.252	0.4976
	重量	UR I	28.990	10.101	0.4632
	全炭素量	UR I	12.332	-2.183	-0.4500
	C/N	UR I	18.705	-1.012	-0.4453

表 4-4-7 母材と地形カテナを異にした場合の土壌特性値と微地形特性値との関係 ($Y = a + bX$ 、 Y ：置換性カルシウム、 X ：微地形特性値)

	Y	X	a	b	R
(高原山)	ex Ca	MCH	1.043	0.189	0.7004
火山灰	ex Ca	MRR L	10.313	0.408	0.7878
	ex Ca	UR I	7.913	1.057	0.6505
	ex Ca	UR S	1.812	0.158	0.2374
(三浦実験林一西向)	ex Ca	MCH	2.156	-0.428	-0.3934
瀬戸波紋岩	ex Ca	MRR L	1.551	0.008	0.0338
	ex Ca	UR I	1.543	-0.278	-0.5796
	ex Ca	UR S	2.519	-0.076	-0.2279
(赤石山黒野呂川端)	ex Ca	MCH	0.440	0.015	0.6414
片岩	ex Ca	MRR L	0.884	0.013	0.2339
	ex Ca	UR I	1.227	0.134	0.7500
	ex Ca	UR S	0.260	0.023	0.3615

表 4-4-8 高原山における土壌特性値と微地形の主成分分析から計算された第 1 主成分との関係 ($Y = a + bX$ 、 Y ：土壌特性値、 X ：微地形第 1 主成分)

Y	X	a	b	R
A 層厚	S L1	11.142	3.559	0.7388
重量	S L1	14.754	16.393	0.6718
容積重	S L1	37.833	18.519	0.2830
全炭素量	S L1	15.397	-4.367	-0.5273
C/N	S L1	20.542	-1.730	-0.7921
ex C a	S L1	6.419	8.051	0.7552

できる。同様な傾向が微地形特性値を変えても認められる(表 4-4-7)。これらの回帰式はいくつかの微地形特性値を用いて計算した結果である。

しかし、微地形は総合的に特性値を用いて区分し、微地形の形態は複数の特性値をもって表わされた。

主成分分析で微地形を数値分類した時、主成分は総合特性値として考えられた。この微地形の主成分 (Z L n) と土壌特性値との関係を検討した(表 4-4-8)。結果は相関係数が高い値を示し、

$$y = a + b (Z L 1)$$

の式はいままで検討してきたものより微地形に関して総合性が高い。

さらに総合性の高い関係は土壌の総合特性値 (Z S n) と微地形の総合特性値 (Z L n) との関係が考えられる。

すなわち、

$$S (Z S n) = f \{L (Z L n)\}$$

実際の例 (高原山) では、

$$Z S 1 = 0.0068 - 0.6619 Z L 1 \quad (r = -0.8479)$$

$$Z S 2 = 0.0130 + 1.6695 Z L 1 \quad (r = 0.5014)$$

ここで Z S 1：土壌特性値の第 1 主成分、固有値 7.71、寄与率 32.1% Z S 2：土壌特性値の第 2 主成分、固有値 4.07、寄与率 17.0% Z L 1：微地形特性値の第 1 主成分、固有値 9.20、寄与率 48.4%

(Z S 1) = a + b (Z L 1) は今までの式の中で最も高い相関係数を示した。主成分分析の際に

用いた特性値の各主成分への因子負荷量を検討し主成分の表わす総合特性で式を解釈するとより理解される。

以上から $S(ZS_n) = f\{L(ZL_n)\}$ は今までの中で、より高い特性値の総合性を持った土壌と微地形との関係を表わした方程式と考えられる。

第5節 数値分類された微地形の有効性

本研究は山地斜面の微地形を、地形カテナ（地形図）と単位区から導かれた微地形特性値を用いて数値化することにより分類を試みた。従来の山地斜面の分類ではなし得なかった微地形の形態を数値的に総合化した分類を行なうことが出来た。この方法に従えば各微地形単位と土壌型と林床型はきわめて明確な対応を示した。さらにこの対応関係を数式化することを試み、総合的な関係式を導いた。

本節では少数の特性値で記載されてきた既往の分類に対して、本研究で初めて試みた微地形の形態的特性の数値記載とそれを総合化した数値分類が未熟土壌の分類や微地形による土壌型の細分類、あるいは森林伐採に伴う土壌の変化にどのように有効性をもつかを考察する。

第1項 土壌・植生と微地形の対応関係についての考察

地形—土壌—植生との規則的な対応関係は従来多くの研究者に認められてきた事実である（日本の森林土壌 1983）。土壌と林床植生は地形とそこでの水などの動態に由来する局所環境により区分されてきた。土壌型は局所地形に由来する水湿状態とそれに伴う腐植の形態、土壌構造、遊離酸化鉄の移動と集積、土色などにより類別されている。林床型は斜面の位置、斜面の形態、土壌型など局所環境と関連した群落の組成的特徴と指標群落で区分されてきた。それ故に微地形—土壌型—林床型との対応関係が明瞭となっていると考えられる。土壌型、林床型は微地形単位に対して必ずしも1対1の対応を示すものでなく、特に広い範囲の分布を持つ土壌型あるいは林床型はいくつかの微地形にまたがり分布することもあると考えられる。土壌型や林床型の中には地形カテナにおける微地形の出現序列に従い斜 表4-5-1 微地形に対応する土壌断面形態と一般物理化学性（主にA層）

微地形	特徴的な土壌特性
残積斜面	1 A ₀ 層は厚く、A層中の根の量が多い。 2 容積量は小さく、粗孔隙が多い。最小容気量は大きい。 3 pHは低く、全炭素量は高い。C/Nは斜面中で最も高い。 4 置換性塩基類は褐色森林土、乾性ポドゾルでは少なく、湿性ポドゾルでは多い。
浸潤斜面	1 A ₀ 層は厚い。腐含量は少ない。 2 透水性は比較的高い。細孔隙が多い場合もある。 3 全窒素量は多く、ポドゾルでは塩基置換容量が高い。
匍行斜面	1 A ₀ 、A層は薄い。腐量は少なく、根量が多い。乾性ポドゾルでは溶脱層、集積層が薄い。 2 容積量は小さく、最小容気量は多い。 3 全炭素量、全窒素量とも高い。置換性塩基類は少ない。
運積斜面	1 腐含量が多い。湿性ポドゾルでは溶脱層が薄い。 2 透水性が小さく、容積量が大きい。細孔隙は多い。 3 化学性は一般に中程度の値を示す。
崩積斜面	1 A ₀ 層は薄く、A層は厚い。腐含量は多い。 2 容積量は比較的大きく、細孔隙は少ない。最小容気量も少ない。 3 塩基置換容量は大きい。湿性ポドゾルを除いて置換性塩基類は多い。
沖積斜面	1 A層は厚い。腐含量は多く、表層の根量は最も少ない。 2 透水性は高い。粗孔隙は小さい場合もある。 3 pHは最も高く、全炭素、全窒素は少ない。C/Nは低い。 塩基置換容量は高く、置換性塩基類は多い。

微地形別に対応する土壌の断面形態と一般物理化学性をアンドリュース実験林を除いた5カ所の調査の結果をまとめ、表4-5-1に示す。これによると、残積斜面、浸潤斜面、匍行斜面での土壌に対して運積斜面、崩積斜面、沖積斜面の土壌は礫量、A層厚、C/N比が明瞭に相違する。運積斜面、崩積斜面、沖積斜面の土壌は上部から移動・堆積した土

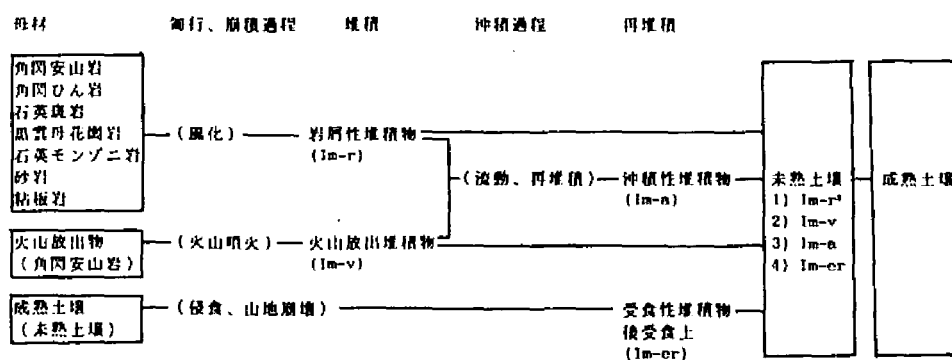
壤が表層にあると考えられ、途中の風化岩礫を含み、表層の礫量が多く、A層厚が厚くなっていると考えられる。運積斜面の土壤も移動すると考えられ、A層の薄いものも認められる。A層の発達には堆積有機物の鉱質土層への浸入なども重要な因子であるが、土壤の移動・堆積もA層の深さに関係していると考えられる。

土壤—地形のこのような対応関係を定量的に比較し、微地形特性値の変化に従う土壤の変化を予測するために、数式化した例は我国では少ない。また既往の報告にある数式も特定の土壤の性質を目的変数として、一つあるいは数個の地形特性値を説明変数としている点からすれば、単に微地形単位と土壤型の関係式としての一側面をとらえたに過ぎない。微地形単位や土壤型は多くの特性値を総合化して分類したものであるからこの両者の対応関係も総合的な関係式を提案する必要がある。本研究で検討した主成分を用いた数式化 $S(Z, S, n) = f\{(Z, L, n)\}$ は土壤型と微地形単位を関係づけたものである。

第2項 微地形による未熟土の分類についての考察

未熟土の分布は三浦実験林では運積斜面と崩積斜面に、赤石山脈では沖積斜面に、そして上高地では運積斜面、崩積斜面と沖積斜面に認められた。これらはいずれも侵食を受けたり、あるいは未熟母材が移動・堆積したものと推定される。未熟土壤は不安定な匍行斜面や運積斜面から運ばれた表層物質が運積斜面、崩積斜面に堆積し、時間経過が短く未熟となっているか、沖積斜面では絶えず新しい物質の供給を谷上部から受けるため未熟となっていると考えられる。このような未熟土を上高地の例で詳細に検討すると幾つかに分類ができ、それは微地形に応じた表層物質の侵食、移動、堆積の相違に対応していることが判明した(表4-5-2)。すなわち運積斜面の上部に自由斜面があり、そこで露出している母岩が物理化学的風化を受けその表層物質は崩落し、

表4-5-2 上高地における未熟土壤の生成過程と分類
(未熟土の分類は移動、堆積、再堆積の過程による)



* 1) Im-r: 岩屑性未熟土, 2) Im-v: 火山性未熟土, 3) Im-a: 沖積性未熟土, 4) Im-cr: 受食性未熟土

運積斜面上に岩屑性堆積物となる。この状態が継続的な場合あるいは堆積後時間経過が短い場合、そこでは岩屑性未熟土 (Im-r 型) が認められる。火山噴火による火山放出物の堆積はどの微地形でも起こるが、時間が経つにつれて残積斜面、浸潤斜面では土壤化が進み、匍行斜面では侵食が起こり、下方の運積斜面、崩積斜面に移動・再堆積してくる。沖積斜面でも火山放出物は谷上部より河川から運搬されて、再堆積が行われているが、堆積物の性質は河川による運搬の影響を受け変質している。この様に主に運積斜面、崩積斜面に火山放出堆積物による火山性未熟土 (Im-v 型) が認められる。岩屑性堆積物や火山性堆積物は地表流や水みち流(田村 1974) などによりさらに侵食を受け、流動・再再堆積して沖積性堆積物を主に沖積斜面につくる。これは沖積性

未熟土 (Im-a) として区分され、上記の未熟土とは物理化学性を異にする。また沖積性未熟土は沖積過程に依存して粒径や化学性が相当に相違する。一方、三浦実験林でみたように斜面上の成熟土壌は土壌匍行、表面侵食、斜面崩壊などの攪乱を受けて受食性堆積物と受食地が生じ、受食性未熟土 (Im-er 型) が認められる。この受食性未熟土については山地崩壊と併せて研究を進める必要があり、微地形との関係で他の場所でも調査される必要がある。

従来の林野土壌分類では未熟土は Im 型と Er 型の 2 つの土壌型に分類されてきた (林業試験場土壌部 1976)。ここでは数値分類された微地形との対応、母材の移動・堆積の相違により岩屑性未熟土、火山性未熟土、沖積性未熟土、受食性未熟土の 4 型を提案した。

表 4-5-3 微地形単位と各土壌群での土壌型との関係

第 3 項 微地形単位による土壌型の細分について

の考察

褐色森林土、乾性ポドゾル、湿性鉄型ポドゾル、未熟土の各土壌型の分布と微地形との対応関係から表 4-5-3 の結果を得た。土壌型と微地形との対応は明瞭である。しかし、斜面に広く分布する土壌型はいく

つかの微地形にまたがり認められ、その物理化学性の値に相違した偏差があり、細分の可能性が考えられる。

高原山において適潤性褐色森林土 (B₀型) の分布は運積斜面と崩積斜面に認められたが物理性や化学性の示す値に相当な偏差がある。運積斜面の B₀型土壌は化学性に大きな偏差を持ち、崩積斜面の B₀型土壌は物理性に偏差がある。同様に適潤性褐色森林土偏乾亜型 (B_{0(d)}型) の分布は浸潤斜面と匍行斜面に認められ、物理性や化学性の示す値に相当な偏差がある。浸潤斜面では物理性に、匍行斜面では化学性に大きな偏差を示す。これらはそれぞれの微地形で水の動態や土壌の動態が相違することから来るもので、この様に数値分類された微地形において同じ土壌型であっても、その土壌の諸性質に相違が認められ、微地形を基準に土壌型の細分の可能性が見いだされる。林地における B_{0(d)}型土壌や B₀型土壌は比較的広く分布しており、幾つかの微地形にまたがって分布する場合が多い。そのため土壌の物理性化学性には大きな偏差を示してしまい、例えば造林木の成長予測が難しい原因となっている。このような場合、土壌の細分を行なってゆく必要がある。

高原山の調査地は流紋岩を基岩とし、斜面は関東ロームが覆っている。しかし運積斜面の一部上方に露岩が見られ、自由斜面を形成している。土壌は火山放出物を母材とする褐色森林土が広く分布する。この調査地では集水高 30 m から下方で急激に表層の礫含量が増加している。自由斜面で物理化学的風化を受けた物質が下方へ落下し、さらに侵食を受け、運積斜面-崩積斜面へと風化物が移動堆積したと考えられる。一方、沖積斜面の礫は半角礫、円礫で、一部上部からの堆積物を混じえながら、ほとんどの礫、堆積物は谷上部からの沖積堆積物から構成されている。この様に表層土壌の礫含量や礫の形態は微地形に対応して表層物質の移動、堆積を検討する上で一つのパラメーターとされてきた。また移動、堆積した表層物質-土壌は残積的な土壌に比較して物理化学的にもその性質を大きく異にしており、特に土壌に占める礫含量は直接物理性に影響を与えると考えられ、斜面における土壌において礫の存在は土壌の性質を決める重要な因子である。それ故に同一の土壌型で礫の含量や形態が相違するとき、この土壌型はこれまで行なわれて

	残積 斜面 Bg-Po111	浸潤 斜面 Ba(d)-Ba	匍行 斜面 Be-Be(d)	運積 斜面 Bo	崩積 斜面 Bo	沖積 斜面 Ba
褐色森林土 (高原山、屋久島)						
乾性ポドゾル (赤石山脈)	Po1	Po11-111	Po1-11	Po111-11	dBo, Po111	Bo, Im
湿性ポドゾル (三浦実験林)	Po111	Po111 -Po(i)111	Po(i)11 -111	Po(i)11-11 , Im-er	Po(i)11 , Im-er	G-Po(i)11
未熟土、ポドゾル (上高地)	Po1	Po1-11	Po1	Im-v, r , Po(h,i)11	Im-v, n , dBo, r	Im-n , dBo, r

いる以上に細分化されるべきであり、それによって土壌の諸性質がより具体的に明らかにされるであろう。礫の含量や形態は微地形に依存しているため、微地形による細分と対応することは十分考えられる。

第4項 森林伐採に伴う土壌の変化についての考察

森林の皆伐に伴う土壌の変化は森林を構成する樹種と樹木の大きさ、伐採時期、伐出方法、気候、土壌特性、造林方法に依存する。林地においてこの変化は一様に生ずるのではなく、微地形に対応した変化を示した。

高原山では架線全木集材を行っているため集運材による直接的な土壌の攪乱は浸潤斜面を除いて余り顕著ではなかった。一方、土壌環境の変化が土壌諸特性にもたらす影響が強く、その一つに堆積有機物と土壌有機物の分解の促進があげられる。柴田ら(1951)、堤(1964)は伐採後堆積有機物は指数関数的に減少すると指摘し、山谷(1965)、塩崎(1980)はこの分解の速度と質的变化は形態の相違に依存するとしている。L、F、Hの各層の変化からみてもこの残積斜面、浸潤斜面、匍行斜面と運積斜面、崩積斜面、沖積斜面とでは堆積有機物の分解速度が相違すると考えられた。土壌表層の侵食は急な傾斜地で激しいが(上田 1965、及川 1977、有光 1980)、匍行斜面(2)、運積斜面で最も急激であった。これに対して浸潤斜面と沖積斜面では移動・堆積によるA層が厚くなることが認められた。表層では全炭素・全窒素が減少し、土壌有機物の分解、無機化が生じている(柴田 1951、堤 1964、上田ら 1965、山谷 1965)が、運積斜面、崩積斜面、沖積斜面では硝酸態窒素の流亡が起こっていると推定される(有光 1980)。無機態窒素の増加は有機物の分解という窒素形態の変化(堤 1964)であり、林地土壌へ窒素の絶対量の増加をもたらせない。

森林土壌では主に堆積有機物の分解によって塩基類が供給されるが新鮮落葉落枝の供給が皆伐後は停止しているため堆積有機物は次第に分解残渣の形態となり土壌への塩基類の付加が失われる。さらに酸性土壌では塩基類は溶脱を受け垂直および水平方向へ移動すると考えられる(Buol et al. 1973、山谷 1966)。残積斜面、匍行斜面(1)、浸潤斜面での塩基類の減少は著しく、供給源の問題と併せて皆伐後の塩基類の回復が問題となる。

これらの変化をアンドリュース実験林の例と比較するといくつかの特徴的な相違点が認められる。第1は高原山では伐採後急激に土壌有機物が分解し全炭素・全窒素を減少させたがアンドリュース実験林の場合全炭素・全窒素が増加した。伐採搬出時に有機物が混入し、伐採後は寡雨のため分解が促されないためと考えられる。第2にアンドリュース実験林では置換性塩基類が増加した点で、高原山の例や Mroz et al.(1985)の結果と相違する。McColl(1978)、Arimitsu(1980)は伐採後土壌溶液中の塩基類は初期段階に増加し、その後急速に減少すると論じている。アンドリュース実験林での調査が寡雨時期であったため塩基類は減少せず、続く雨期を経て減少するか(Mroz 1985)、または表層の有機物の分解に伴い土壌ソーラム中に塩基類の集積が起こる(Snyder et al. 1985)可能性もあり、この点を明らかにするためには長期のモニタリングが必要である。

直接的な土壌攪乱や堆積有機物、土壌有機物の分解の促進は土壌の物理性に变化をもたらす。土壌硬度が高まり、容積重が増加して、粗孔隙が減少、細孔隙が増加、全孔隙が減少する、そして透水性の低下がもたらされる。この変化は土壌の悪化としてとらえられることが多い(柴田 1965、Dyrness 1965、1967、Wert et al. 1981、Froelich et al. 1983、Gent et al. 1984)。土壌の物理性の悪化については高原山とアンドリュース実験林ではほぼ同じ傾向を示した。しかし、これら

の変化をもたらす要因は異なり、アンドリュース実験林ではトラクターや大径木の運材による圧密と攪乱であり、高原山では鉍質土壌の裸出による雨滴攪乱、土壌侵食及び土壌有機物の分解であった。これらの悪化の程度が微地形により相違することは明らかである。

土壌物理化学性が最も変化し易い地形は浸潤斜面であり、匍行斜面、残積斜面であった。それ故、森林施業においては特にこの様な微地形に対しては注意を払い、なんらかの対策を立て土壌保全に努めなければならない。長期的かつ累積的な変化は林地のもつ地力や水土保持機能を低下させられるからである。例えば流亡による土壌中の塩基類の減少は森林の成立によって回復されるとは期待し難く、残存有機物の分解と岩石の風化などによる供給があるとしても伐採のたびごとに減少すると考えられる。また土壌の物理性の悪化を指摘できたとしても一体にどのくらいの時間を経て回復するかは依然として不明である。今後、森林の伐採などに伴う土壌の悪化を防ぎ、土壌保全技術を確立して行くためには各微地形単位毎に以下のような点を解明して行くことが必要である。

- (1) 伐採後の変化の程度を土壌諸特性ごとに解明する。
- (2) 土壌諸特性の悪化と回復の変化パターンを把握する。
- (3) 森林の更新期間と悪化した土壌の回復期間を明らかにする。
- (4) 伐採前、成林状態での地力と伐採後成林状態の地力を比較して、累積的な変化を明らかにする。

これらの解明により、森林伐採に伴う土壌の悪化の程度を予測し、対策を立てることが可能となるであろう。

第6節 要 約

1. 主な4つの土壌群—褐色森林土、乾性ポドゾル、湿性鉄型ポドゾル、未熟土の土壌型の分布は微地形と対応していた。
2. 高原山と屋久島での褐色森林土群では残積斜面、浸潤斜面、匍行斜面に乾性型の土壌型が分布し、運積斜面、崩積斜面には適潤性の土壌型が分布し、沖積斜面には湿性の土壌型が分布した。上部3つの微地形と下部の微地形の間には、土壌の特性値に大きな差異が認められた。また微地形の出現序列により土壌型が地形カテナに沿って繰り返し分布した。
3. 赤石山脈での乾性ポドゾル群において典型的な乾性ポドゾルは残積斜面と匍行斜面に分布した。運積斜面、崩積斜面、沖積斜面では乾性ポドゾル化作用が弱くなる。ポドゾル化作用は鉄、アルミニウムを溶脱し下層へ集積するが、これと同調して有機物の移動集積が起こった。粘土鉍物、特に Lepidocrosite の土層中の分布は地形カテナに沿った水の動態を表していると推定された。
4. 三浦実験林での湿性鉄型ポドゾルにおいて、典型的な湿性鉄型ポドゾル ($P_{w(t)}$ 型) は運積斜面に分布していた。崩積斜面と匍行斜面では湿性鉄型ポドゾル化土壌となり、残積斜面にはほとんど湿性ポドゾルは認められなかった。湿性鉄型ポドゾルは土壌の物理性とくに透水性と細孔隙に依存していた。湿性鉄型ポドゾルの分布域の地形カテナでは上部に置換性塩基類が多かった。
5. 上高地の未熟土は運積斜面、崩積斜面、沖積斜面に分布した。岩屑性未熟土、火山性未熟土、沖積性未熟土が微地形において区分される。これらの未熟土は塩基置換容量や置換性塩基類に大きな差異があった。R P 型腐植酸と P 型腐植酸が未熟土に認められたが、A 層から B・C 層

への腐植酸型の変化は微地形と未熟土に応じていた。

6. 土壌群により土壌特性値は相違するが、それぞれの微地形に応じた特徴的な土壌特性値を示した。また乾性ポドゾルと湿性鉄型ポドゾルでは地形カテナ上の分布パターンの相違により土壌化学性が相違した。

7. 赤石山脈と上高地での亜高山針葉樹林ではアオモリトドマツ、シラベなど広範囲に分布する森林型は微地形との結び付きは余り強くない。一方、カラマツ林は崩積斜面、沖積斜面の未熟土に分布した。この種が先駆種的な性格を持つことから崩積斜面、沖積斜面など土壌の移動・堆積が頻繁に起こる場所に成立するものと考えられる。

8. 赤石山脈と上高地での亜高山針葉樹林の林床型はコケ型、ササ型を除き良く微地形に対応する。屋久島のスギ天然林ではこの傾向は一層強く、種組成が異なっても林床型の分布は微地形に依存していると言える。亜高山針葉樹林、スギ天然林において後継稚樹の分布は匍行斜面ついで残積斜面、浸潤斜面に密度が高く、運積斜面と崩積斜面には少なかった。赤石山脈、上高地、屋久島で林床群落の出現種数は沖積斜面が最多で、平均多様度は匍行斜面、運積斜面が高く、これに総合優占度を合わせた全多様度では残積斜面と沖積斜面が高かった。

9. 高原山と三浦実験林で、ヒノキ造林木の樹高成長は地形カテナの位置関係に関連する微地形特性値に1次的に相関が認められた。また微地形特性値から区分された微地形単位にも対応関係が見いだされる場合がある。

10. 森林の皆伐による土壌の変化は森林を構成する樹種と大きさ、伐採時期、伐採搬出方法、気候、土壌特性、造林方法や地形に依存する。

11. 伐採による土壌へのインパクトは直接的要因と間接的要因に区分した。高原山では架線集材による一部表層土壌の攪乱はあるが、間接的なインパクトー鉋質土壌の裸出による雨滴攪乱、土壌侵食及び堆積有機物、土壌有機物の分解の促進によるものが主であった。アンドリュース実験林では大径木の伐倒による地表攪乱、トラクター集材による圧密と攪乱が主で土壌調査には雨期を経て土壌有機物の分解の促進は明かではない。菌糸による潑水性の発現も大きな要因であった。2つの調査地の土壌は相違していた。高原山ではA層は厚く、PHは低い。また全炭素・全窒素含量は多く、塩基置換容量は比較的低い。粗孔隙が比較的多く、透水性が高い。アンドリュース実験林は相対的に反対の土壌特性を示す。この様に条件が違いため皆伐による土壌の変化には共通の傾向も見いだされたが一般的には要約できない。

12. 土壌断面形態では堆積有機物層は匍行斜面で移動し薄くなり、崩積斜面と沖積斜面で集積し、厚くなった。アンドリュース実験林ではトラクター集材によるA層の減少と圧密が顕著であった。土壌の化学性は高原山で伐採後、土壌有機物の分解が促進されたのに対してアンドリュース実験林では有機物の土壌への混入があり、これを反映して変化は相違した。高原山では全炭素、全窒素、置換性塩基類が減少したが、アンドリュース実験林では増加した。しかし2つの調査地に微地形に対応した共通の変化が認められた。崩積斜面、沖積斜面でC/N比は低下した。塩基置換容量は運積斜面で増加し、残積斜面で減少した。置換性塩基類は匍行斜面で減少が顕著であった。土壌の物理性は2つの調査地ともほぼ同じ傾向を示した。粗孔隙は減少し、細孔隙は増加する、最大容水量は増加し、最小容気量は減少する。容積重が増加し、透水性の低下は最も顕著な傾向であった。しかしこれらの変化に最も強く関わる要因は2つの調査地で異なっていた。高原山では土壌有機物の分解、アンドリュース実験林では圧密であった。これらの変化が最も強く現れた微地形は2つの調査地とも浸潤斜面であり、ついで残積斜面であった。

13. 土壤と地形の関係を数式化し、より総合的な解を求めた。1 地形カテナでは高い相関を持つ 1 次回帰式がもとまり、これにより土壤型相互間の相違を見いだすことが出来た。総合的な解として、微地形を区分した際の主成分 (Z L n) と土壤特性の主成分 (Z S n) を用いて

$$S(Z S n) = f \{L(Z L n)\}$$

で表わすことができた。高原山において、この式は

$$(Z S 1) = 0.0068 - 0.6619 (Z L 1)$$

となり、検討した回帰式の中で最も高い相関係数 (-0.8479) を示した。

結 言

地形は森林土壌の生成・分布や植生・植物の生育に強い影響を及ぼす因子である。Dokuchaev以来、地形と土壌との対応関係、林床植生との対応関係、林木の成長との関係を明らかにする試みは種々行われてきた。既に述べたように山田(1955)の微細地形と森林立地因子研究や久保(1961)の土壌調査のための地形分類、竹下・中島(1961)の斜面の微地形と森林土壌的立地性についての研究はその主なものである。この時点で久保(1961)や小泉(1977)は斜面地形の分類が十分なされていないと述べている。その後 Dalrymple ら(1968)により9つの微地形単位が分類・定義された。しかし、依然として微地形の形態が数値的に十分記載されていないので微地形の分類が定性的であった。このため微地形と土壌の生成・分類や植生との対応関係は定性的にしか解析されなかった。あるいはいくつかの地形特性値相互の関係が述べられたに過ぎない。

本研究では山地斜面を尾根から谷にかけた地形カタナ上で、より詳細に記載し、これをもとに微地形の数値分類を行うことで微地形の形態を数値的に明確にした。さらに数値分類した微地形と土壌型や植生型の対応関係を明らかにし、森林伐採による土壌の変化が微地形に依存することも考究した。また土壌型と微地形との関係を、微地形の総合特性値を用いて地形関数の方程式で解き、相互関係を定量化できた。

しかしながら山地斜面での地形形成作用の解明が残されている。最近の土壌と微地形の研究は地形研究から地形形成作用としての土壌・水の動態に焦点を当てたものが主になりつつある(Gerrard 1981、Birkland 1984、Richard et al. 1984、Jungerius ed. 1985)。

これからの研究動向としても地形の発達過程と地形形成作用が問題とされ、これらの結果から地形と土壌・植生との関係の解明が一層深まるものと推測される。今後、残された問題として、斜面での水・熱の動態、マスムーブメントの量的な把握、微地形の出現序列と微地形の形成作用との関係の解明、さらに残積土壌に対する運積土壌の諸性質の解明が必要である。

本研究において明らかにした数値分類による微地形と土壌の対応関係、その関係の総合的な数式化、微地形別の伐採に伴う土壌の変化の判明などの成果に微地形形成作用の詳細な解明が加われば、土壌型の細分、伐採などの林地の攪乱による土壌の変化に対する予測が可能になり、水土保持の指針として有効な基礎資料ともなり得るであろう。そして、これらが土地管理に役立つことができれば筆者の望外の喜びである。

摘 要

本研究は、山地斜面における微地形の形態的特性を数値化して分類することによって、微地形と土壌の諸性質、植生との対応関係を明らかにし、森林伐採に伴う土壌の変化を微地形別に明らかにすることを目的とするものである。この目的のため、栃木県高原山、長野営林局三浦実験林、屋久島、上高地、赤石山脈、アメリカ合衆国オレゴン州アンドリュース実験林で微地形・土壌・植生を調査し、これら相互の関係を検討した。

尾根から谷にかけて地形カテナ上で微地形の形態的特性を数値化し、分類することを試みた。この数値分類法によれば各微地形単位と土壌型及び林床型はきわめて明確な対応を示した。またそれぞれの微地形の特性と、そこにおける土壌の物理化学性、森林群落の構造特性との関連性が明らかになった。

微地形の記載に用いた単位区の面積と微地形特性値との関係を、高原山で単位区の面積を変えて調査し、単位区から導かれた微地形特性値が単位区の面積により変化することが明らかになった。

森林伐採による土壌の変化を高原山のヒノキ・スギ林とアメリカ合衆国オレゴン州アンドリュース実験林のダグラスファー林で調査し、その結果、伐採に伴う森林土壌の変化も各微地形に依存することが明らかになった。

微地形と土壌との関係を数式化して、総合的な解が明らかになった。

1. 特性値による微地形の記載

微地形を数値的に把握するために地形図と単位区から22の微地形特性値を導き、10の地形カテナの特性値と12の単位区の特性値を用いて微地形を記載した。地形カテナから導かれた特性値は微地形の位置関係を表現し、単位区から導かれた特性値は微地形の面的な形態を表現した。本研究では微地形の最小単位や土壌・林床植生の広がり considering 単位区の面積を10 m×10 mとしたが、単位区から導かれる微地形特性値は単位区の面積により変化する。単位区から導かれた微地形特性値－面積曲線は変曲点を持ち、地形カテナの複雑性を示した。この微地形特性値－面積曲線から同質性を示す最大の微地形単位の面積が決定できる。

2. 微地形の数値分類

高原山とアンドリュース実験林における1地形カテナ、三浦実験林での同一尾根の4地形カテナ、屋久島、上高地と赤石山脈における多数の地形カテナをそれぞれ対象に、主成分分析により微地形を残積斜面、浸潤斜面、匍行斜面、運積斜面、崩積斜面、沖積斜面に区分した。それぞれの形態的特性は次のように要約される。

残積斜面は斜面最上部に位置し、谷に対し急傾斜で、緩傾斜の凸型面を示し、集水面積は狭く、排水面積は最も広い。

浸潤斜面は斜面上部に位置し、谷に対し急傾斜で、やや急傾斜の微凹型から微凸型面を示し、集水面積に対し排水面積の割合が大きい。

匍行斜面は斜面中腹部に位置し、尾根と谷に対し急傾斜で、急傾斜の明瞭な凸型面を示し、集水面積に対し排水面積の割合がやや大きい。

運積斜面は斜面中腹部に位置し、急傾斜の平面を示し、表面曲率は最も大きく、集水面積と排水面積が等しい。

崩積斜面は斜面下部に位置し、尾根に対し急傾斜で、凹型面を示し、排水面積に対し集水面積の割合が大きい。

沖積斜面は斜面の最下部に位置し、谷に対し緩傾斜で、緩傾斜の明瞭な凹型面を示し、集水面積が最も広い。

これらの微地形の特性値に基準範囲が設定され、これにより微地形形態の区分に応用することが出来る。

高位の地形分類単位が微地形と対応する場合、例えば段丘残積斜面と表わす。地形カテナにおける微地形の組合せ、出現序列は斜面の形成過程や履歴を表わすものと推察される。

3. 微地形と土壌の諸性質並びに分布

高原山と屋久島での褐色森林土、赤石山脈での乾性ポドゾル、三浦実験林での湿性鉄型ポドゾル、上高地での未熟土の各土壌型と微地形とは対応した分布を示した。

褐色森林土群の分布域の広い土壌型は微地形により細分の可能性が推定される。例えばB₀型土壌は運積斜面と崩積斜面で物理化学性が相違した。

乾性ポドゾル群の典型的な乾性ポドゾル(P₀₁型)は赤石山脈で残積斜面と匍行斜面に分布した。運積斜面>崩積斜面>沖積斜面の順に鉄、アルミニウム、土壌有機物の溶脱・集積は弱くなる傾向が認められた。

湿性鉄型ポドゾル群の典型的な湿性鉄型ポドゾル(P_{w(01)}型)は三浦実験林で運積斜面に分布した。褐色森林土や乾性ポドゾルに比較して置換性塩基類が地形カテナの上部に多い傾向が認められた。

未熟土壌は上高地で運積斜面、崩積斜面、沖積斜面に分布し、岩屑性未熟土、火山性未熟土、沖積性未熟土に分類した。三浦実験林で認められた受食性未熟土と併せてこれらの分布は微地形に対応していた。岩屑性未熟土は運積斜面に、受食性未熟土は運積斜面を中心に崩積斜面にわたり、火山性未熟土は崩積斜面を中心に、沖積性未熟土は沖積斜面に分布した。これらの未熟土は塩基置換容量と置換性塩基類に相違が認められた。またR P 型腐植酸とP型腐植酸のA層とB、C層での形態が乾性ポドゾル、暗色系褐色森林土と相違し、未熟土相互間にも違いが認められた。4つの未熟土の型は新たな分類である。

微地形に対応した土壌諸特性が認められた。それぞれの微地形での土壌特性は以下に要約される。

残積斜面：A₀層は厚く、A層中の根の量は多い。容積重は小さく、粗孔隙が多い。最小容気量は大きい。PHは低く、全炭素量は多く。C/N比は斜面中で最も高い。置換性塩基類は褐色森林土と乾性ポドゾルでは少なく、湿性鉄型ポドゾルでは多い。

浸潤斜面：A₀層は厚い。礫含量は少ない。透水性は比較的高い。細孔隙が多い場合もある。全窒素量は多く、ポドゾルでは塩基置換容量が高い。

匍行斜面：A₀、A層は薄い。礫量は少なく、根の量は多い。乾性ポドゾルでは溶脱層、集積層が厚い。容積重は小さく、最小容気量は多い。全炭素量、全窒素量とも多い。置換性塩基類は少ない。

運積斜面：礫含量が多い。湿性ポドゾルでは溶脱層が厚い。透水性が低く、容積重が大きい。

細孔隙は多い。化学性は一般に中程度を示す。

崩積斜面：A₀層は薄く、A層は厚い。礫含量は多い。容積重は比較的大きく、細孔隙は少ない。最小容気量も少ない。塩基置換容量は高い。湿性ポドゾルを除いて置換性塩基類は多い。

沖積斜面：A層は厚い。礫含量は多く、表層の根の量は最も少ない。透水性は高い。粗孔隙が少ない場合もある。pHは最も高く、全炭素、全窒素量は最も少ない。C/N比低い。塩基置換容量は高く、置換性塩基類は多い。

4. 微地形と森林群落、天然更新、造林木の成長

赤石山脈と上高地において亜高山針葉樹林のアオモリトドマツ林とシラベ林は広範囲に分布し、微地形との対応は強くなかった。カラマツ林は崩積斜面、沖積斜面に分布した。土壌の移動・堆積による未熟土が分布する崩積斜面と沖積斜面は先駆種的な性格を持つカラマツ林が成立しやすいと考察した。

赤石山脈と上高地の亜高山針葉樹林と屋久島のスギ天然林の林床型はコケ型やササ型など広範囲に分布する型を除き微地形と明瞭に対応した分布を示した。林床型の構成種の垂直的、水平的な分布の違いがあり林床型の指標種は地域により相違する。林床群落は沖積斜面で出現種数が多く、匍行斜面、運積斜面で平均多様度が高く、残積斜面と沖積斜面で全多様度が高かった。

亜高山針葉樹林とスギ天然林の後継稚樹は残積斜面、浸潤斜面に密度が高く分布し、運積斜面と崩積斜面では低かった。天然更新は残積斜面と浸潤斜面で行なわれやすいと推測された。

高原山と三浦実験林におけるヒノキ造林木の樹高成長は地形カテナの位置関係に関連する微地形特性値と1次的に相関が高かった。

5. 伐採による土壌の変化と微地形

森林の皆伐による土壌の変化は森林を構成する樹種と大きさ、伐採時期、伐採搬出方法、気候、土壌特性や地形に依存する。

高原山では雨滴攪乱、土壌侵食と堆積有機物・土壌有機物の分解の促進が土壌の変化をもたらした主要因であると考えられ、アンドリュース実験林では大径木(樹高50 m—60 m)の伐倒による地表攪乱とトラクター集材による圧密や堆積有機物と土壌の攪拌が土壌の変化をもたらした主要因であると考えられた。両調査地に相違した土壌の変化が認められた。アンドリュース実験林ではA層厚の減少と土壌硬度の増加が残積斜面と浸潤斜面で顕著であった。高原山では全炭素、全窒素、置換性塩基類の減少が全ての微地形で認められたが、アンドリュース実験林では逆に増加した。一方、共通して認められた土壌の変化は、堆積有機物が匍行斜面で移動し薄くなり、崩積斜面と沖積斜面で集積し厚くなった。C/N比は崩積斜面と沖積斜面で低下した。塩基置換容量は残積斜面で減少し、運積斜面で増加した。置換性塩基類は匍行斜面で顕著に減少した。土壌物理性の変化は、粗孔隙が減少し、細孔隙が増加し、全孔隙は減少した。最大容水量は増加し、最小容気量は減少した。容積重は増加し、透水性の低下は最も顕著な変化であった。これらの物理性の変化は浸潤斜面で、ついで残積斜面で強く認められた。

6. 土壌特性方程式—地形関数の解明

高原山、三浦実験林、赤石山脈における森林土壌のA層厚、礫含量、全炭素量、C/N比や置換性塩基類は集水長や縦断線型性に高い相関係数をもつ1次式に回帰した。回帰係数の正負と絶

対値の大きさから土壌群の相違や山地帯と亜高山帯の土壌と微地形の関係の相違を推定できる。

さらに総合的な解を求めるために、高原山における土壌特性値の主成分 (Z S n) と微地形特性値の主成分 (Z L n) 相互の関係を検討した結果、

$$(Z S n) = a + b (Z L n)$$

として高い相関係数を示した。土壌と微地形は多数の特性値を持つため微地形の数値分類などの際に、主成分分析を行なった結果を用いると総合的な土壌特性方程式の解を得ることができる。

謝 辞

本研究を行うにあたり、研究の端緒から適切な御助言とご指導を頂き、また研究の便宜を与えて頂いた農林水産省森林総合研究所関西支所長有光一登博士に深い感謝の意を表する。また有光一登博士には本論文のまとめにも多くの御助言を賜った。

微地形の数値分類の契機となったのは宇都宮大学農学部教授前田禎三博士と行なった林床型と土壌の調査であった。森林総合研究所海外調査科長大角泰夫博士には特に亜高山帯の調査地選定や調査に多くの適切な御助言を頂いた。

研究を実施して行くにあたり、森林総合研究所九州支所の森貞和仁氏には終始多大な協力を頂いた。また森林総合研究所四国支所林地保全研究室長加藤正樹氏、森林総合研究所立地環境科の宮川清氏、高橋正通氏、田中永晴氏にはそれぞれの調査地で協力を頂いた。

アメリカ合衆国太平洋北西部林業試験場のフレデリック・スワンソン博士には研究の協力、地形変動についての多くの示唆に富む御助言を頂いた。同試験場のゴードン・グラント博士には沖積地に関して有益な論議をして頂いた。

本研究は指定研究「表面流去水に関する研究」、長野営林局「三浦実験林調査」、農林省・建設省・環境庁「上高地地域森林保全整備計画調査」、熊本営林局・日本林業技術協会「屋久島の森林施業」、科学技術庁長期在外研究員派遣「森林施業に伴う土壌の動態の解明」などの一環として行われ、有光一登博士、元木曾分場長下野園正氏、東京農工大学農学部教授真下育久博士、元林業試験場四国支場長久保哲茂氏、元静岡大学農学部教授橋本与良博士、フレデリック・スワンソン博士など多くの方々に協力、御助言、便宜等を頂いた。

岐阜大学農学部教授脇孝介博士には研究遂行上で御助言を頂いた。

森林総合研究所生物工学科長小谷圭司博士は本論文の推考の際に多くの御助言と御指摘を頂いた。

本研究は以上の多くの方々のご指導と協力のもとに行うことが出来たものであり、ここに深く感謝の意を表す。

最後に本研究を遂行する上でまた取りまとめにあたり多くの有益な御助言、御指導を頂いた京都大学農学部教授堤利夫博士に、また本論文を取りまとめるにあたり有益な御助言を頂いた京都大学農学部教授久馬一剛博士に深い感謝の意を表す。

参 考 文 献

- (1) Aandahl, A. R., 1948, The characterization of slope positions and their influence on the total nitrogen content of a few virgin soils of Western Iowa, Soil Sci. Soc. Proc. 449-454.
- (2) Ahnert, F., 1970, An approach towards a descriptive classification of slopes, Z. Geomorph. Suppl. 10, 71-84.
- (3) Ahnert, F., 1970, A comparison of theoretical slope models with slopes in the field, Z. Geomorph. Suppl., 10, 88-101.
- (4) Ahnert, F., 1976, Brief description of a comprehensive three-dimensional process-response model of landform development, Z. Geomorph. N. F. Suppl., 25, 29-49.
- (5) 有光一登, 1980, 森林の皆伐と造林環境の変化, 林業技術, 15 - 19.
- (6) Arimitsu, K. and Kato, M., 1980, Tensionfree lysimeter study of the impact of clear-cutting to the site quality, Forest Site, Classification-Analysis-Human Impact, IUFRO Workshop, 207-221.
- (7) Armstrong, A., 1976, A three-dimensional simulation of a slope forms, Z. Geomorph. N. F. Suppl., 25, 20-28.
- (8) Berntsen, C.M, Rothacher, J (1959) A guide to the H.J. Andrews Experimental Forest PNN Station, Forest Service, U.S.D.A.
- (9) Binkley, D., 1984, Does forest removal increase rates of decomposition and nitrogen release ?, Forest Ecology and Management, 8, 229-223.
- (10) Birkland, P.W., 1984, Soils and Geomorphology, Oxford Univ., pp372.
- (11) Brown, G. (ed.), The X-ray identification and crystal structures of clay minerals, pp 544, Mineralogical Soc., London, 1961.
- (12) Buol S.W, Hole F.D, McCracken R.J., 1973, Soil Genesis and Classification (日本語訳 和田、久馬、音羽、浜田、井上、ペトロジ、土壌学の基礎, 博友社)
- (13) Butler, B., 1982, A new system for soil studies, J. Soil Sci., 33, 581-595.
- (14) Conacher, A. J., Dalrymple, J. B., 1977, The nine unit landsurface model: An approach to pedogeomorphic research, Geoderma, 18, 1-154.
- (15) Conacher, A. J., Dalrymple, J. B., 1978, Identification, measurement and interpretation of some pedogeomorphic processes, Z. Geomorph. N. F. Suppl., 29, 1-9.
- (16) Curtis, L. F., Doornkamp, J. C., Gregory, K. J., 1965, The description of relief in field studies of soils, J. Soil Sci., 16, 16-30.
- (17) Dalrymple, J. B., Blong, R. J., Conacher, A. J., 1968, An hypothetical nine unit landsurface model, Z. Geomorph. N. F., 12, 60-76.
- (18) 土壌養分測定法委員会, 1970, 土壌養分分析法, P.251-253, 養賢堂, 東京.
- (19) Durgin, P.B., 1980, Organic matter content of soil after logging of fir and redwood forests, USDA Forest Service, Research Note, PSW-346, 1-4.
- (20) Dyrness, C.T., 1965, Soil surface condition following tractor and high-lead logging in the Oregon Cascades, J. of Forestry, 63, 272-275.
- (21) Dyrness, C.T., 1967, Soil surface conditions following

- skyline logging, USDA Forest Service, Research Note, PNW-55, 1-8.
- (22) Evans, I. S., 1972, 2. General geomorphometry, derivatives of altitude, and descriptive statistics, " Spatial analysis in Geomorphology " R. J. Chorley (ed.) 17-90, pp.393, Harper & Row Publishers, New York.
- (23) Franklin, J.F., Denison, W., McKee, A., Maser, C., Sedell, J., Swanson, F.J., and Juday, G., 1981, Ecological characteristics of old-growth Douglas-fir forests, USDA Forest Service, General Technical Report, PNW-118, pp 48.
- (24) Froehlich, H.A., and McNabb, D.H., 1983, Minimizing soil compaction in Pacific Northwest forests, (ed. Stone, E.L.), Forest Soils and Treatment Impacts. Proc. of Sixth North America Forest Soils Conference, 159-192.
- (25) Froehlich, H.A., Miles, D.W.R., and Robbins, R.W., 1985, Soil bulk density recovery on compacted skid trails in Central Idaho, Soil Sci. Soc. of Amer. J., 49, 1015-1017.
- (26) Furley, P. A., 1968, Soil formation and slope development: 2. The relationship between soil formation and gradient angle in the Oxford area, Z. Geomorph. N. F., 12, 25-42.
- (27) 古川久雄, 1976, 近畿地方低地部における土壌の分布則および分布単位に関する事例研究, ベドロジスト, pp 31 - 49.
- (28) Gent, J.A., Ballard, R., and Hassan, A.E., 1983, The impact of harvesting and site preparation on the physical properties of lower coastal plain forest soils, Soil Sci. Soc. of Amer. J., 47, 595-598.
- (29) Gent, J.A., Ballard, R., Hassan, A.E., and Cassel, D.K., 1984, Impact of harvesting and site preparation on physical properties of Piedmont forest soils, Soil Sci. Soc. of Amer. J., 48, 173-177.
- (30) Gerrard, A.J., 1981, Soils and Landforms, An Integration of Geomorphology and Pedology, George Allen & Unwin, pp.219.
- (31) Gossman, H., 1976, Slope modeling with changing boundary conditions - effect of climate and lithology, Z. Geomorph. N. F. Suppl., 25, 72-88.
- (32) Gregory, K. J., Brown, J. H., 1966, Data processing and the study of land form, Z. Geomorph., 10, 237-263.
- (33) Hack, J. T., Goodlett, J. C., 1960, Geomorphology and forest ecology of a mountain region in the central Appalachians, U.S. Geol. Surv. Prof. Paper, 347, 1-66.
- (34) Halpenny, J.C., Ingraham, K.P., 1984, Long-Term Ecological Research In the United States, A Network of Research Sites, 2-3, LETR.
- (35) 羽田野誠一, 1971, 山地における地形分類と土地分類, 地理学評論, 44-2, 116-118.
- (36) 平野昌繁・横田修一郎, 1976, 西南日本に例をとった電子計算機による地形数値解析, 地理学評論 49-7, 440 - 454.
- (37) Hole, F. D., 1978, An approach to landsurface analysis with emphasis on soils, Geoderma, 21, 1-23.
- (38) Huggett, R. J., 1975, Soil landscape systems: A model of soil genesis, Geoderma, 13, 1-22.
- (39) 石水照雄・大友 篤・磯部邦昭, 1976, 地域傾向面分析の意義・適用事例および問題点, 地理学理論 49-7, 455 - 469.
- (40) 伊藤達雄・村松久良光・大熊健治, 1976, メッシュ法による土地利用型の判別分析, 地理学評論 49-7, 470 - 479.

- (41) Iwasa, Y., 1965, Mineralogical Studies of Iron Minerals in Soils, Bull. Nat. Inst. Ag. Sci. B, 15, 187-244.
- (42) Jenny, H., 1961, Derivation of state factor equations of soils and ecosystems, Soil Sci. Soc. Am. Proc., 25, 385-388.
- (43) Jenny H., 1980, The Soil Resource, Springer-Verlag, New York, pp377.
- (44) Jungerius, P.D., 1985, Soils and Geomorphology, Catena Supplement 6, pp.174.
- (45) 加藤芳朗, 橋本与良, 1978, 日本の土壌—その生成学的側面, 科学, 48, 286-295.
- (46) 加藤芳朗, 1979, 土壌生成・分類における母材の意義, ペドロジスト, 23, 58-65.
- (47) 河田弘・小島俊郎, 1976, 環境測定法(5)-森林土壌, 共立出版, pp166.
- (48) 河原輝彦, 1987, ヒノキ林に混じったアカマツの働き, 林業技術, 542, 12-15.
- (49) King, L., 1957, The uniformitarian nature of hillslopes, Trans., Edin. Geol. Soc., 17, 81-102.
- (50) King, G. J., Acton, D. F., Arnaud, R. J. ST., 1983, Soil landscape analysis in relation to soil distribution and mapping at a site within the Weyburn association, Can. J. Soil Sci., 63, 657-670.
- (51) Kirkby, M. J., 1976, Deterministic continuous slope models, Z. Geomorph. N. F. Suppl., 25, 1-19.
- (52) Kleiss, H. J., 1970, Hillslope sedimentation and soil formation in northeastern Iowa, Soil Sci. Soc. Amer. Pro., 34, 287-290.
- (53) 小林国夫, 1975, 日本アルプスの自然, 築地書館, PP 258.
- (54) 小林繁男, 加藤正樹, 森貞和人, 高橋正通, 1981, 屋久島のスギ天然林(1) 林床型と立地環境, 森林立地, 23, 1 - 10.
- (55) 小林繁男, 加藤正樹, 1982, 屋久島のスギ天然林(2) 林分構造と更新過程, 森林立地, 24, 10 - 17.
- (56) 小林繁男, 1982, 森林の皆伐に伴う土壌の変化, ペドロジスト, 26, 150-163.
- (57) 小林繁男, 森貞和仁, 有光一登, 大角泰夫, 1984, 野呂川越地形系列における微地形と土壌特性との関係, 日林論, 95, 199-202.
- (58) 小林繁男, 1984, 森林植物群落の多様性, 種生物学研究, VIII, 35-45.
- (59) Kobayashi, S., Morisada, K., Ohsumi, Y., Arimitsu, K., 1987, Effects of understory vegetation, soil, and microlandform on natural regeneration of subalpine forest in Akaishi mountains, JAPAN, Human Impacts and Management of Mountain Forests, Proceedings of IUFRO Workshop, 373-385.
- (60) Kobayashi, S., Swanson, F. J., 1987, Effects of harvesting impacts on soil of a douglas-fir forest in the Cascade Mountains, Oregon, U.S.A., Human Impacts and Management of Mountain Forests, Proceedings of IUFRO Workshop, 31-45.
- (61) 古賀正照, 1959, 吉野林業の問題点, 山林, 900, 68-71.
- (62) 近藤鳴雄, 1967, 日本南アルプス南部における山岳土壌の垂直的成帯性について, ペドロシスト, 11, 153-169.
- (63) 近藤鳴雄, 1959, 南アルプスのポドゾル及びポドゾル的土壌について, ペドロシスト, 3, 2-7.
- (64) 小泉武栄, 1977, 山地における地形分類の最近の動向と課題, 地学雑誌, 86-2, 38 - 46.
- (65) 久保哲茂, 1961, 地形, 森林立地 3-1, 38 - 43.

- (66) 熊田恭一, 1977, 土壤有機物の化学, 学会出版センター, pp 220
- (67) 熊木洋太・羽田野誠一, 1982, 地形分類と地形地域区分, 国土地理院時報56, 7 - 13.
- (68) 熊本営林局, 1982, 屋久島国有林の森林施業, PP 140.
- (69) 熊本営林局, 日本林業技術協会, 1982, ヤクスギ天然林施業の現地適用化調査報告書, PP 82.
- (70) Lanyon, L. E., Hall, G. F., 1983, Land-surface morphology: 1. Evaluation of small drainage basin in eastern Ohio, Soil Sci., 136, 291-299.
- (71) Lanyon, L. E., Hall, G. F., 1983, Land-surface morphology: 2. Predicting potential landscape instability in eastern Ohio, Soil Sci., 136, 382-386.
- (72) 町田貞ら編集, 1981, 地形学辞典, 二宮書店, pp 767.
- (73) 前田禎三・宮川 清, 1970, 林床植生による造林適地の判定, 日本林業技術協会, pp 89.
- (74) Marron, D. C., 1982, Hillslope evolution and the genesis of colluvium in Redwood National Park, Northwestern California: The use of soil development in their analysis: Ph. D. Thesis, Univ. of California, Berkeley, pp169.
- (75) 真下育久, 1960, 森林土壌の理学的性質とスギ、ヒノキ林の生長に関する研究, 林野土調報, 11, 1-182.
- (76) 真下育久, 1961, 土壌の物理性, 吸収板による簡単なpF値の測定とこれによる土壌、水および孔隙の区分, 森林立地3(1), 32-34.
- (77) 松井光瑠, 1980, 表層に還元現象のみられる森林土壌の研究, 東大博士論文, pp126.
- (78) Matsui, T., 1967, An Application of Soil Stratigraphy to the Quaternary Geology and Landscape Development of Kyushu, JAPAN, Quaternary Soils, 206-219.
- (79) 松井 健, 1971, 土壌の二次鉱物について, 地質学雑誌77(9), 607-612.
- (80) Matsui, T., Kondo, N. and Yano, Y., 1971, A clay mineralogical aspects of the vertical soil zonality on the Japan South Alps. I Introduction and results at the lower elevation, Soil Sci. and Plant Nutrition, 17(6), 199-209.
- (81) McColl, J. G., 1978, Ionic composition of forest soil solutions and effects of clearcutting, Soil Sci. Soc. of Amer. J., 42, 358-363.
- (82) McDonald, R. C., Speight, J. G., Walker, J., Hopkins, M. S., 1984, Australian Soil and Land Survey, Inkata Press, pp 160.
- (83) Miles, D. W. R., Swanson, F. J., and Youngberg, C. T., 1984, Effects of landslide erosion on subsequent Douglas-fir growth and stocking levels in the Western Cascades, Oregon, Soil Sci. Soc. of Amer. J., 48, 667-671.
- (84) 水山武司, 1967, 南アルプスにおける山岳土壌の分布様式, 地理学評論, 40, 261-270.
- (85) Mroz, G. D., Jurgensen, M. F., and Frederick, D. J., 1985, Soil nutrient changes following whole tree harvesting on three northern hardwood sites, Soil Sci. Soc. of Amer. J., 49, 1552-1557.
- (86) 長野営林局, 1976, 上高地国有林, pp11.
- (87) 長野営林局, 1986, 三浦実験林調査中間報告書, pp220.
- (88) 中野尊正・吉川虎雄, 1951, 地形調査法, 古今書院, pp 176
- (89) 日本の森林土壌編集委員会, 1983, 日本の森林土壌, 日本林業技術協会, pp680.

- (90) 野上道男、杉浦芳夫、1986、パソコンによる数理地理学演習、古今書院 pp 275.
- (91) 農林水産技術会議事務局、1978、「農林漁業における環境保全的技術に関する総合研究」試験成績書(第1集) - 地域生態系の実態解析 -, 3-77.
- (92) 農林水産省林業試験場土壌部監修、1982、森林土壌の調べ方とその性質、森林土壌研究会編、林野弘済会、pp328.
- (93) 奥野忠一ら、1978、応用統計ハンドブック、養賢堂、328-377.
- (94) Pavlik, H. F., Hole, F. D., 1977, Soilscape analysis of slightly contrasting terrains in southeastern Wisconsin, Soil Sci. Soc. Am. J., 41, 407-413.
- (95) Penck, W., 1953, Morphological analysis of landforms : "Morphological analysis of landforms " H. Czech and K. C. Boswell, Macmillan & Co. Ltd., London and Basingstoke.
- (96) Richards, K.S., Armett, R.R., Ellis, S., (ed), 1984, Geomorphology and Soils, George Allen & Unwin, pp441.
- (97) 林業試験場土壌部、1976、林野土壌の分類、1975、林試研報280, 1-28.
- (98) 林業試験場、1982、昭和56年度国有林野事業特別会計技術開発試験成績報告書 - ボドゾル地帯の更新法 -, 575 - 599.
- (99) 林野庁林業試験場、1955、国有林野土壌調査方法書、24-29、林野共済会、東京.
- (100) 林野庁、1975、奥大井地域森林開発保全調査報告書、昭和49年度国土総合開発事業調整費調査、1 - 216.
- (101) 林野庁、1983、上高地地域森林保全整備計画調査報告書、pp175.
- (102) Ruhe, R. V., 1956, Geomorphic surfaces and the nature of soils, Soil Sci., 82, 441-455.
- (103) Ruhe, R. V., Walker, P. H., 1968, Hillslope models and soil formation. I. Open systems, Trans. 9th. Internat. Cong. Soil Sci. Adelaide, 4, 551-560.
- (104) Ruhe, R. V., 1969, Quaternary landscapes in Iowa, Iowa State Univ. Press, pp.255, Iowa.
- (105) Runge, E. C. A., 1973, Soil development sequence and energy models, Soil Sci., 115, 183-193.
- (106) Scheidegger, A. E., 1961, Mathematical models of slope development, Geol. Soc. Am. Bull., 72, 37-50.
- (107) 柴田信男、茨木親義、石井稔、1951、状況の変化が土壌に及ぼす影響(1)日林大会講、59, 133 - 134.
- (108) 式正英、1962、応用地理学の最近の動向、地理 5-1, 25 - 35.
- (109) 森林保全研究会、1957、森林保全に関する野呂川水系総合調査報告書、pp150.
- (110) Snider, M.D., and Miller, R.F., 1985, Effects of tractor logging on soils and vegetation in eastern Oregon, Soil Sci. Soc. of Amer. J., 49, 1280-1282.
- (111) Snyder, K.E., and Harter, R.D., 1984, Changes in solum chemistry following clear cutting of northern hardwood stands, Soil Sci. Soc. of Amer. J., 48, 223-228.
- (112) Sollins, P., and McCorison, F.M., 1981, Nitrogen and carbon solution chemistry of and old growth coniferous forest watershed before and after cutting, Water Resources Research, 17, 1409-1418.
- (113) Speight, J. G., 1968, Parametric description of land form, "Land Evaluation" G. A. Stewart(ed.), 239-250., Macmillan of Australia.

- (114) Speight, J. G., 1976, Numerical classification of landform elements from air photo data, *Z. Geomorph. N. F. Suppl.*, 25, 154-168.
- (115) Speight, J. G., 1984, Explicit landform description for a land resource survey: Unpublished.
- (116) Strahler, A. N., 1956, Quantitative slope analysis, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 67, 571-596.
- (117) 須藤俊男, 1974, 粘土鉱物学, pp 498, 岩波書店, 東京.
- (118) 竹下敬司・中島康博, 1960, 斜面の微地形と土壌に関する2,3の考察, *ペドロジスト*, 4, 68-78.
- (119) 竹下敬司・中島康博, 1961, 斜面の微地形とその森林土壌的立地性について若干の考察, *森林立地*, 3, 1-8.
- (120) 田村俊和・三浦 修, 1971, 北上山地北緑地域の斜面堆積物, *第4紀研究*, 10, 21-30.
- (121) 田村俊和, 1974, 最近の地形学, *土と基礎*, 22, 89-94.
- (122) 田村俊和, 1980, 地形分類の方法について, *西村嘉助先生退官記念地理学論文集*, 82-88.
- (123) Troeh, F. R., 1964, Landform parameters correlated soil drainage, *Soil Sci. Soc. Proc.*, 28, 808-812.
- (124) Troeh, F. R., 1965, Landform equations fitted to contour maps, *Amer. J. Sci.*, 263, 616-627.
- (125) Trofimov, A. M., Moskovkin, V. M., 1984, The dynamic models of geomorphological systems (the qualitative theory of dynamic systems' application), *Z. Geomorph. N. F.*, 28, 77-94.
- (126) Trofimov, A. M., Moskovkin, V. M., 1984, An abrasion (undercut) slope diffusion model (ASDMO-1), *Z. Geomorph.*, 28, 71-76.
- (127) 筑波大学, 大井川プロジェクト, 1982, 山地崩壊にともなう土砂流出の機作と環境保全に関する山岳地域生態的研究 2, 大井川流域の環境特性 - 崩壊の素因と誘因 -, pp 123
- (128) 堤 利夫, 1964, 森林の成立及び皆伐が土壌の2・3の性質に及ぼす影響について, *第2報 皆伐による土壌中諸物質質量の変化*, *京大演報*, 35, 110-126.
- (129) 上田晋之助、堤 利夫、柴田信男, 1965, 吉野林業地帯における地力の維持と増進に関する研究, *京大演報*, 37, 102-121.
- (130) Vreeken, W. J., 1973, Soil variability in small loess watersheds, Clay and organic carbon content, *Catena*, 1, 181-196.
- (131) 和田光史, 1977, 黒ボク土の活性アルミニウムと非晶質 - 準晶質粘土鉱物, *粘土化学*, 17-4, 143-151.
- (132) Walker, P. H., Hall, G. F., Protz, R., 1968, Soil trends and variability across selected landscapes in Iowa, *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 32, 97-101.
- (133) Walker, P. H., Hall, G. F., Protz, R., 1968, Relation between landform parameters and soil properties, *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 32, 101-104.
- (134) Walker, P. H., Ruhe, R. V., 1968, Hillslope models and soil formation. II. Closed systems, *Trans. 9th. Internat. Cong. Soil Sci.*, Adelaide, 4, 561-568.
- (135) Wert, S., Thomas, B. R., 1981, Effects of skid roads on diameter, height, and volume growth in Douglas-fir, *Soil Sci. Soc. of Amer. J.*, 45, 629-632.
- (136) Yaalon, D. H., 1975, Conceptual models in pedogenesis: Can soil-forming functions be solved? *Geoderma*, 14, 189-205.
- (137) 山田昌一, 1955, 微細地形解析に関する森林立地学的研究, *林野*

共済会，pp282.

(138) 山谷孝一，1965，ヒバ林伐採跡地土壌の経年変化について(1)，日林誌，199-204.

(139) 山谷孝一，1966，ヒバ林伐採跡地土壌の経年変化について(2)，日林誌，394-400.

(140) Young, A., 1964, Slope profile analysis, Z. Geomorph. Supple., 5, 17-27.

(141) Young, A., 1972, Slopes: Oliver & Boyed, pp.288, Edinburgh.